



**TUGAS AKHIR - TM091486 (KE)**

**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN DI DALAM  
*SYMMETRIC FLAT -WALLED NOZZLE PADA CLOSE CIRCUIT  
WIND TUNNEL***

**RIZKY AKBAR WIRADHIKA  
2111 100 091**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng. Ph.D**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM091486 (KE)

**EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW CHARACTERISTICS IN  
SYMMETRIC FLAT -WALLED NOZZLE AT CLOSED  
CIRCUIT WINDTUNNEL**

**RIZKY AKBAR WIRADHIKA  
2111 100 091**

**Supervisor :  
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng. Ph.D**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Industrial Technology Faculty  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016**



**STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN DI  
DALAM SYMMETRIC FLAT-WALLED NOZZLE PADA  
CLOSE CIRCUIT WIND TUNNEL**

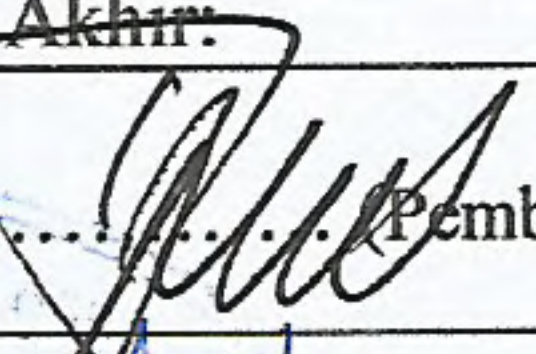
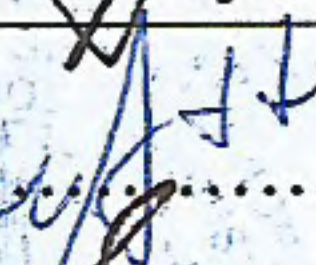


**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**RIZKY AKBAR WIRADHIKA**  
NRP. 2111 100 091

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:	
Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng, PhD. NIP. 196412281990031002	 ..... (Pembimbing)
Dr. WAWAN ARIES WIDODO, S.T., M.T. NIP. 197104051997021001	 ..... (Penguji I)
NUR IKHWAN, S.T., M.Eng NIP. 196709151995121001	 ..... (Penguji II)
DEDY ZULHIDAYAT NOOR, S.T., M.T., Ph.D NIP. 197512062005011002	 ..... (Penguji III)

**SURABAYA  
JULI, 2016**



# **STUDI EKSPERIMEN KARAKTERISTIK ALIRAN DI DALAM SYMMETRIC FLAT -WALLED NOZZLE PADA CLOSE CIRCUIT WIND TUNNEL**

**Nama Mahasiswa : RIZKY AKBAR WIRADHIKA**  
**NRP : 2111 100 091**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D**

## ***Abstrak***

*Nozzle* merupakan suatu bentuk saluran tertutup yang mengalami pengecilan luas penampang melintang sepanjang arah aliran fluida. Pengecilan luas penampang menyebabkan aliran fluida mengalami peningkatan kecepatan yang berakibat menurunnya tekanan aliran. Dalam melihat performa *nozzle* terdapat beberapa hal perlu dianalisis yaitu *pressure loss*, *flowrate* dan, *coefficient of pressure* ( $C_p$ ). Besar *pressure loss* yang terjadi akibat flow contraction effect menyebabkan aliran fluida tidak mampu menahan laju pembentukan lapisan batas. Terjadinya *pressure loss* yang besar menyebabkan debit atau *flowrate* yang keluar dari *nozzle* tidak sesuai dengan apa yang diharapkan. *Pressure loss* yang besar menyebabkan nilai  $C_p$  (*coefficient of pressure*) yang besar pula. Nilai  $C_p$  menjadi parameter penting untuk menganalisa dalam konteks penerapannya di *nozzle*. Nilai  $C_p$  yang besar menyebabkan nilai  $C_d$  (*coefficient of discharge*) semakin kecil. Penurunan nilai  $C_d$  ini dapat mengurangi performa kerja pada *nozzle*. Nilai  $C_d$  merupakan perbandingan antara besarnya *actual discharge nozzle* dengan *ideal discharge nozzle rate*. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keterkaitan nilai *discharge coefficient* ( $C_d$ ) dan turbulensi terhadap performa *nozzle* yang merupakan bagian dari *closed loop-windtunnel*.

Penelitian mengenai *nozzle* ini menggunakan metode eksperimen dengan alat uji *close circuit wind tunnel*. *Nozzle* yang digunakan pada penelitian ini adalah *symmetric flat-walled octagonal nozzle* yang memiliki geometri panjang *nozzle*,  $L_1 = 630$

mm, panjang *upstream channel*,  $L_2 = 150$  mm, panjang *downstream channel*,  $L_3 = 220$  mm, tinggi *inlet nozzle*,  $H_i = 770$  mm, dan tinggi *outlet nozzle*,  $W_2 = 300$  mm, diameter hidrolik,  $D_h = 806$  mm, serta *area ratio*,  $AR \text{ nozzle} = 6.6$ . Pada penelitian ini digunakan ketiga bilangan *Reynolds* berdasarkan diameter hidrolik yaitu  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .

Profil kecepatan memiliki distribusi yang cenderung seragam/*uniform*. Untuk ketiga bilangan *Reynolds* menghasilkan *pressure coefficient* ( $C_p$ ) yang paling tinggi pada  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  namun jika ditinjau melalui grafik *trendline*, ketiga bilangan *Reynolds* tersebut memiliki *trendline* yang cenderung sama yaitu menurun searah aliran. Peningkatan bilangan *Reynolds* memberikan pengaruh pada peningkatan nilai *coefficient of discharge* ( $C_d$ ), nilai yang paling tinggi terletak pada  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ . Hasil eksperimen ini juga menunjukkan bahwa intensitas turbulensi di *outlet Nozzle* memiliki nilai tertinggi pada  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ .

**Kata kunci :** *Pressure loss, symmetric flat-walled nozzle, closed circuit wind tunnel, closed circuit wind tunnel*

# EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW CHARACTERISTICS IN SYMMETRIC FLAT -WALLED NOZZLE AT CLOSED CIRCUIT WINDTUNNEL

**Student Name:** RIZKY AKBAR WIRADHIKA  
**NRP** : 2111 100 091  
**Major** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Lecture** : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D

## *Abstract*

*Nozzle is a form of closed channels which is experienced a constriction of cross-sectional area along the direction of flow of the fluid. Constriction of the cross-sectional area causes an increasing the speed of the fluids resulting the decreasing of flow pressure. In observing the performance of the nozzle there are some things that need to be analyzed, include : pressure loss, flow rate and, coefficient of pressure ( $C_p$ ). Number of pressure loss that occurs as a result of the contraction effect of flow causes the fluid flow is not able to withstand the rate of formation of the boundary layer. The occurrence of a large pressure loss causes the discharge or flow rate out of the nozzle does not match what was expected. Great pressure loss causes great number of  $C_p$  (coefficient of pressure).  $C_p$  values become important parameters to be analyzed in the context of its application to the nozzle. Great value of  $C_p$  causes decreasing the value of  $C_d$  (coefficient of discharge) . The decreasing value of  $C_d$  can reduce the performance of work on the nozzle.  $C_d$  value is the ratio between the amount of actual discharge nozzle and ideal discharge nozzle rate. Aims of this study is to determine the relevance value of discharge coefficient ( $C_d$ ) and turbulence on the performance of a nozzle which is part of the closed loop-wind tunnel.*

*Experiment method is used in this research by means of closed circuit wind tunnel test. Nozzle used in this study was symmetric flat-walled octagonal nozzle, which has,  $L_1 = 630$  mm, length upstream channel,  $L_2 = 150$  mm and the length of the*

downstream channel,  $L_3 = 220$  mm, height of nozzle inlet,  $H_i = 770$  mm, and height of nozzle outlet,  $H_o = 300$  mm, hydraulic diameter,  $D_h = 806$  mm and ratio area,  $AR_{\text{nozzle}} = 6.6$ . In this experiment, three Reynolds number are used based on the hydraulic diameter which are  $Re_{D_h} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{D_h} = 2.96 \times 10^5$  and  $Re_{D_h} = 4,68 \times 10^5$ .

Velocity profil has a tend uniform distribution. The results obtained in this study is that the separation in three Reynolds numbers and its coefficient of pressure ( $C_p$ ) are highest in  $Re_{D_h} = 1,98 \times 10^5$ , but when it reviewed from the chart trendline, these three Reynolds number has a trendline that tends same which decreases unidirectional flow. An increase in the Reynolds number give a significant influence in increasing the value of coefficient of discarge ( $C_d$ ), the highest value lies in  $Re_{D_h} = 4,68 \times 10^5$ . The experimental result also shows that the intensity of the turbulence in the nozzle outlet has highest at  $Re_{D_h} = 6,24 \times 10^4$ .

**Keywords :** Pressure loss, symmetric flat-walled nozzle, closed circuit wind tunnel, closed circuit wind tunnel

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. **Ayah tercinta, Sugiyono Rahayu**, atas segala cinta, doa, semangat dan dedikasinya dalam meneteskan peluhan keringat untuk memenuhi kebutuhan hidup saya hingga dapat meraih gelar Sarjana.
2. **Ibu tercinta, Siswati**, atas segala cinta dan tetesan air mata di setiap doa yang dipanjatkan untukku senantiasa menemani, mengiringi dan menguatkan saya dalam menjalani setiap masa perkuliahan.
3. **Adik tersayang, Afifah Izzaturrahayu** , atas segala senyuman, canda tawa dan kenakalanmu yang selalu membangkitkan semangat dan inspirasi saya.
4. **Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. Ph.D**, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
5. **Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng. PhD** selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
6. **Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT, Bapak Nur Ikhwan, ST., M.Eng**, serta **Bapak Dedy Zulhidayat Noor ST., MT.,Ph.D**. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.



7. **Bapak Sutikno S.T.,M.Eng.**, selaku Dosen wali penulis, terima kasih atas kebaikan dan kesabaran serta motivasi bapak selama ini.
8. **Bapak Nur Rochman dan Bapak Sutrisno** selaku pembimbing di lab. Mekanika Fluida yang telah membimbing dan memberikan saran-saran selama dalam pembuatan alat dan pengambilan data eksperimen.
9. Adek Adita Utami S.T yang telah memberikan semangat, dukungan, bantuan, motivasi serta doa hingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Rekan satu tim *Close Circuit Windtunnel* tugas akhir penulis, Romi D.K. Naibaho, Fahmi K.H, Abel Bryan dan Erin yang selalu memberikan dukungan dan kerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
11. Teman-teman BEM 14/15 khususnya Kabinet kolaborasi dan kementrian inovasi dan karya, terima kasih atas cerita, bantuan dan motivasinya yang selalu memberikan inspirasi dan semangat untuk selalu menjadi lebih baik.
12. Teman-teman lab. mekanika fluida, Ridwan, khumaroh Yulia, Putri, Salma, Ateng, Dinar, Louis, Nando, Adit, Fauzi, Gerald, Nana, Haikal, Fajar, Mas Sudahra, Mas Pieter, Mas Ganda, Mas Endy dan teman-teman M54 semuanya terima kasih atas bantuan dan dukungannya.
13. Seluruh Dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS,
14. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
15. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 15 Juli 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>viii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Wind Tunnel.....	5
2.1.1. Rangkaian Terbuka (Open circuit wind tunnel) .....	5
2.1.2. Rangkaian Tertutup (Close circuit wind tunnel) .....	6
2.2. Geometri nozzle .....	8
2.3. Konsep Boundry Layer .....	8
2.3.1. Karakteristik Boundary Layer .....	10
2.3.2. Pengaruh Pressure .....	11
2.3.3. Turbulen Struktur .....	13
2.4. Bilangan Reynolds .....	14
2.5. Pressure Coefficient (Cp) .....	15
2.6. Intensitas Turbulensi .....	15
2.7. flowmeter berbasis beda tekanan .....	16
2.7.1. Penerapan pada nozzle .....	17
2.7.2. Discharge coefficient (Cd) .....	18
2.8. Penelitian Terdahulu Accelerated Boundary Layer .....	20
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>23</b>
3.1 Instalasi Penelitian.....	23
3.1.1. Honey comb dan Screen.....	24
3.1.2. Fan Axial .....	24
3.1.3. nozzle .....	24
3.2. Peralatan Pendukung .....	25

3.3. Analisa Parameter-Parameter yang Dianalisa .....	28
3.4. Prosedur Pengambilan Data Eksperimen .....	30
3.4.1 Kalibrasi Inverter.....	30
3.4.2. Kalibrasi Pressure Transducer dan Inclined Mano.....	31
3.4.3. Langkah Pengukuran Coefficient Pressure (Cp) .....	32
3.4.4 Langkah Pengukuran Profil Kecepatan .....	32
3.5. Prosedur Pengolahan Data Eksperimen.....	33
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>35</b>
4.1 Profil Kecepatan .....	35
4.1.1 Distribusi Perubahan Kecepatan Maksimum .....	35
4.1.2 Distribusi Profil Kecepatan .....	37
4.2 Distribusi Pressure Coefficient (Cp).....	40
4.3 Distribusi Coefficient of Discharge (Cd).....	42
4.4 Intensitas Turbulensi .....	43
<b>BAB V KESIMPULAN DAN PENUTUP .....</b>	<b>47</b>
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran .....	48
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>49</b>

## DAFTAR GAMBAR

### BAB II

Gambar 2.1 <i>Open circuit wind tunnel</i> .....	5
Gambar 2.2 <i>Closed circuit wind tunnel</i> .....	7
Gambar 2.3 <i>Geometrinozzle</i> .....	8
Gambar 2.4 <i>Boundary layer</i> laminar dan turbulen .....	9
Gambar 2.5 Definisi ketebalan <i>boundary layer</i> , <i>displacement thickness</i> dan <i>momentum</i> .....	11
Gambar 2.6 Perkembangan <i>boundary layer</i> akibat pengaruh <i>pressure gradient</i> .....	12
Gambar 2.7 Diagram skematis alat ukur <i>Preston Tube</i> .....	17
Gambar 2.8 <i>Pressure gradient parameter</i> , <i>K</i> pada <i>accelerated boundary layers</i> .....	19
Gambar 2.9 Grafik distribusi kecepatan maksimum ( <i>U<sub>max</sub></i> ) dari hasil eksperimen dan numerik pada <i>asymmetricnozzle</i> .....	20
Gambar 2.10 Grafik distribusi <i>pressure coefficient</i> ( <i>C<sub>p</sub></i> ) dari hasil eksperimen dan numerik pada <i>asymmetricnozzle</i> .....	21

### BAB III

Gambar 3.1 Skema Instalasi Penelitian .....	23
Gambar 3.2 Skema <i>nozzle</i> .....	25
Gambar 3.3 Skema gabungan <i>Pitot tube</i> dengan Mistar ....	26
Gambar 3.4 <i>Inclined manometer</i> .....	27
Gambar 3.5 <i>Pressure transducer</i> dan data akuisisi .....	27
Gambar 3.6 <i>Inverter</i> .....	28
Gambar 4.1 Distribusi kecepatan maksimum ( <i>U<sub>max</sub></i> ) hasil eksperimen untuk $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$ dan $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .....	36
Gambar 4.2 Distribusi Profil Kecepatan $u/U_{maks}$	



(a.) $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , (b.) $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$ , (c.) $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .....	39
Gambar 4.3 Distribusi <i>Coefficient Pressure</i> ( $C_p$ ) untuk $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$ $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .....	41
Gambar 4.4 Distribusi <i>coefficient of discharge</i> ( $C_d$ ) untuk <i>Reynolds</i> $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$ dan $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .....	42
Gambar 4.5 Sinyal fluktuasi kecepatan aliran udara pada (a.) $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , (b.) $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$ , (c.) $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .....	44

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 perbandingan intensitas turbulensi pada setiap variasi $Re$ .....	44
--	----



## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini ilmu pengetahuan dan teknologi telah berkembang sangat pesat. Hal ini memacu manusia untuk terus berfikir kreatif dan berkreasi menciptakan hal-hal yang baru serta melakukan banyak penelitian yang mendatangkan kebermanfaatan. Penelitian-penelitian tersebut diharapkan mendatangkan kebermanfaatan di masyarakat luas serta melengkapi dan menyempurnakan penelitian sebelumnya. Banyak sekali penelitian dibidang mekanika fluida seperti penelitian tentang wind tunnel dimana wind tunnel sendiri terbagi menjadi 2 yaitu *open loop wind tunnel* dan *closed loop wind tunnel*. *Open loop wind tunnel* merupakan tipe terowongan udara yang tidak kontinu sehingga mengikuti jalur lurus mulai dari jalur masuk melalui kontraksi (*nozzle*) ke *test section*, diikuti dengan *diffuser*, rumah fan dan saluran keluar. Sedangkan *closed loop wind tunnel* merupakan terowongan udara yang memiliki jalur udara yang kontinu dan sebagian besar tipe ini adalah jalur tunggal.

*Closed loop wind tunnel* merupakan peralatan yang banyak diteliti dalam ilmu mekanika fluida dimana alat ini terdiri dari berbagai macam komponen penunjang seperti *nozzle*, *honeycomb*, *screens*, *diffuser*, *elbow* dan komponen lainnya. *Closed loop wind tunnel* digunakan untuk melakukan pengujian aerodinamik terhadap sebuah model yang pada umumnya adalah sayap pesawat. Dalam sebuah *closed loop wind tunnel*, *nozzle* mengambil peran yang cukup signifikan dimana berfungsi untuk mempercepat aliran yang masuk pada *test section* agar kecepatan aliran yang diinginkan saat aliran bodi uji dapat dicapai. Didalam *nozzle* biasanya dipasang *honeycomb* dan *screens*. Menurut Ghobanian (2010), penempatan screen dapat menurunkan intensitas turbulensi jika dibandingkan kondisi tanpa *screen*, baik berdasarkan posisi penempatan screen maupun dengan diameter kawat *screen* yang berbeda. Ketika terdapat aliran yang tidak uniform dalam sumbu  $x$



dengan kecepatan dan sudut tertentu yang kemudian mengenai screen, maka kecepatan aliran akan berbelok lebih sejajar dengan sumbu  $x$ , walaupun kecepatan setelah melewati *screen* akan berkurang. Semakin banyak *screen* yang digunakan maka aliran akan semakin *uniform*. Sehingga fluktuasi kecepatan yang terjadi akan semakin kecil dan intensitas turbulensi juga akan semakin berkurang. Kualitas aliran juga ditentukan oleh ukuran *screen* yang digunakan, kestabilan asal aliran, geometri saluran uji, dan kondisi lingkungan.

*Nozzle* merupakan suatu bentuk saluran tertutup yang mengalami pengecilan luas penampang melintang sepanjang arah aliran fluida. Pengecilan luas penampang *nozzel* menyebabkan aliran fluida mengalami peningkatan kecepatan yang berakibat menurunnya tekanan aliran. Dalam melihat performa *nozzle* terdapat beberapa hal perlu dianalisis yaitu *pressure loss*, *flowrate*, *coefficient of pressure*. Beberapa hal tersebut dapat menjadi parameter utama dalam melihat apakah sebuah *nozzle* dikatakan baik atau tidak. Hubungan antara aspek-aspek tersebut yaitu dijelaskan oleh Jan Bikersma (2003) yang menyatakan bahwa besar *pressure loss* yang terjadi akibat *flow contraction effect* sehingga aliran fluida tidak mampu menahan laju pembentukan lapisan batas. Terjadinya *pressure loss* yang besar menyebabkan debit atau *flowrate* yang keluar dari *nozzle* tidak sesuai dengan apa yang diharapkan. *Pressure loss* yang besar menyebabkan nilai  $C_p$  (*coefficient of pressure*) yang besar pula. Nilai  $C_p$  menjadi parameter penting untuk menganalisa dalam konteks penerapannya di *nozzle*. Nilai  $C_p$  yang besar menyebabkan nilai  $C_d$  (*coefficient of discharge*) semakin kecil. Penurunan nilai  $C_d$  ini dapat mengurangi performa kerja pada *nozzle*. Nilai  $C_d$  merupakan perbandingan antara besarnya *actual discharge nozzle* dengan ideal *discharge nozzle rate*. Nilai  $C_d$  berbanding terbalik dengan nilai  $C_p$  (Chaudhry dan Yevjevich, 1993). Salah satu yang menyebabkan berkurangnya nilai  $C_d$  adalah terbentuknya lapisan batas yang terlalu tebal pada dinding-dinding di sisi *exit nozzle* yang menyebabkan berkurangnya luas daerah efektif *exit nozzle*.



Hussain dkk, (2005) melakukan penelitian mengenai efek dari dimensi *nozzle* terhadap performa *nozzle*. Mereka menggunakan *nozzle* yang dibedakan ukuran dimensinya. Hasil yang diperoleh yaitu semakin besar sudut konvergensi *nozzle* maka akan semakin besar tingkat turbulensi yang terjadi. Turbulensi yang besar menyebabkan penurunan *boundary layer thickness* sehingga nilai *Cd* dapat meningkat. Hasil lain yaitu semakin panjang *tip length* akan memberi kesempatan *boundaiy layer* untuk berkembang sehingga ketebalan dari *boundary layer* semakin besar. *Boundary layer* yang semakin besar ini menyebabkan *flow rate* yang keluar dari *nozzle* semakin kecil sehingga *Cd* semakin kecil. Jackson dan Davis (2001) melakukan penelitian pada *nozzle* yang digunakan untuk *hydraulic mining* pada pembuatan *China clay*. Mereka menyimpulkan bahwa pengurangan panjang dinding *nozzle* dapat mengurangi nilai dari *displacement thickness* bagian *output nozzle*. Pengurangan *displacement thickness* ini menaikkan nilai *Cd* sehingga memperbaiki performa *nozzle*. Sedangkan Escuider, dkk (1998) melakukan penelitian tentang respon dari *boundary layer* pada aliran yang melalui *accelerated boundary layer* dan *favorable pressure gradient* dengan menggunakan *low speed open – return wind tunnel*. Escuider, dkk menggunakan  $Re\theta = 1700$  dan nilai maksimum *pressure gradient parameter* ( $K$ ) =  $4,4 \times 10^{-6}$ . Hasil yang diperoleh adalah bahwa relaminarisasi aliran terjadi pada  $x = 3,2$  m dan  $x = 4,3$  m. Pada bagian ini nilai *Reynolds stress* pada *boundary layer* turun secara drastis.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan pada latar belakang, didapatkan penjelasan bahwa *honeycomb* dan *screens* memiliki peranan yang cukup signifikan dalam membuat aliran *uniform* dan mempengaruhi performa *nozzle*. Oleh karena itu perlu dipelajari bagaimana pengaruh *honeycomb* dan *screens* dalam *closed loop wind tunnel* ini.

Panjang *nozzle* setelah mengalami pengecilan penampang (*tip length*) juga mempengaruhi perkembangan *boundary layer*





pada *nozzle*. Semakin panjang *tip length* menyebabkan penambahan daerah perkembangan *boundary layer*. Hal ini membuat *boundary layer* menebal. Penebalan ini membuat nilai *Cd* berkurang (Hussain dkk, 2005). Oleh karenanya perlu dipelajari bagaimana karakteristik dari *boundary layer* pada aliran melalui *nozzle* dengan panjang daerah *tip length* dan sudut konvergensi tertentu. Dengan mengetahui karakteristik dari *boundary layer* tersebut, maka akan mempermudah kita untuk melakukan penelitian dalam rangka meningkatkan performa *nozzle*.

### 1.3 Tujuan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah, penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran fluida didalam *nozzle* pada *closed loop wind tunnel* dengan cara eksperimen. Secara garis besar, tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui keterkaitan *discharge coefficient (Cd)* terhadap performa *nozzle*.
2. Untuk mengetahui keterkaitan distribusi kecepatan yang terjadi didalam *nozzle*.
3. Untuk mengetahui keterkaitan distribusi tekanan yang terjadi di dalam *nozzle*.
4. Untuk mengetahui keterkaitan turbulensi terhadap performa *nozzle*.

### 1.4 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian ini tidak melebar dari tujuan penelitian, maka dibutuhkan beberapa batasan masalah, yaitu:

1. *Nozzle* yang diteliti merupakan bagian dari *closed loop wind tunnel*.
2. Kondisi aliran pada *inlet nozzle* adalah *steady*, *incompressible viscous* dan *uniform*.
3. Efek perpindahan panas akibat aliran fluida dalam *nozzle* dapat diabaikan.
4. Kekasaran permukaan pada dinding *nozzle* diabaikan.



## BAB 2

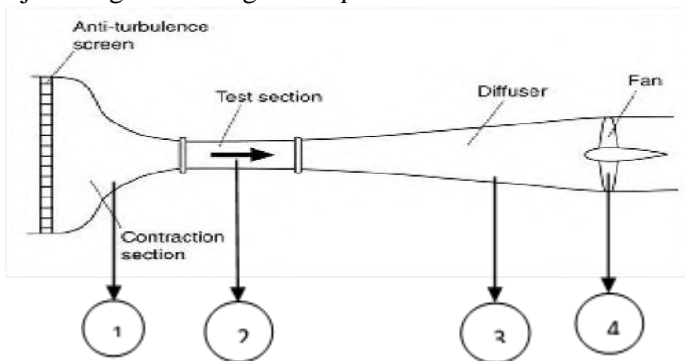
### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Wind Tunnel (Terowongan Angin)

*Wind tunnel* atau terowongan angin adalah alat riset yang dikembangkan untuk membantu dalam menganalisa efek angin yang bergerak atau di sekitar *object* padat. Terowongan angin ini digunakan untuk mensimulasikan keadaan sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya-gaya aerodinamik. *Wind tunnel* dibedakan menjadi 2 rangkaian, yaitu rangkaian terbuka (*Open circuit Wind tunnel*) dan rangkaian tertutup (*Closed circuit Wind tunnel*).

##### 2.1.1 Tipe Wind Tunnel

Pada tipe terowongan ini udara mengikuti jalur lurus dari jalur masuk melalui kontraksi ke *test section*, diikuti dengan *diffuser*, rumah *fan*, dan saluran keluar ke udara. Pada gambar 2.1 ditunjukkan gambar rangkaian *open circuit Wind tunnel*.



Gambar 2.1 *Open circuit wind tunnel* (Singh dkk, 2013)

Keterangan gambar:

1. *Contraction section (nozle)*
2. *Test section*
3. *Diffuser*
4. *Fan*



Pada *Open circuit Wind tunnel* memiliki keuntungan dan kerugian diantaranya yaitu:

Keuntungan:

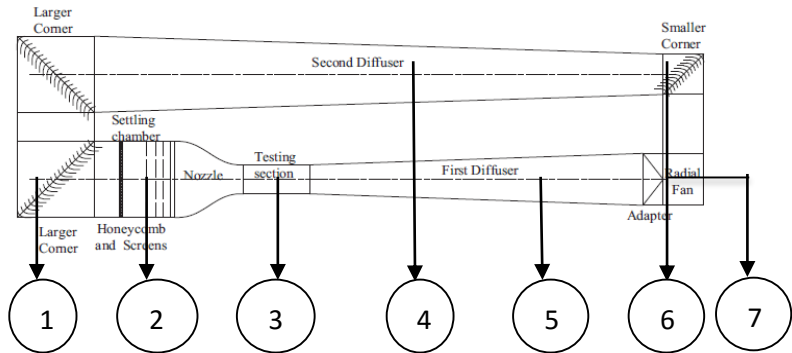
- Biaya konstruksi rendah
- Bisa digunakan dengan motor pembakaran dalam atau melakukan banyak visualisasi aliran jika inlet dan outlet keduanya terbuka ke atmosfer

Kerugian:

- Jika diletakkan pada ruangan dibutuhkan penyaringan tambahan pada inlet untuk mendapatkan aliran yang bertambah tinggi. Dengan cara yang sama inlet/outlet terbuka ke atmosfer, dimana angin dan cuaca dingin dapat mempengaruhi operasi.
- Jika dioperasikan dengan kecepatan dan ukuran yang besar, diperlukan energi yang banyak.
- Untuk ukuran yang besar ( penampang uji/*test section*,  $A > 70\text{ft}^2$ ) menyebabkan kebisingan sehingga menimbulkan masalah lingkungan dan membatasi jam operasi.

### **2.1.2. Rangkaian Tertutup (Close Circuit Wind Tunnel)**

Terowongan ini mempunyai jalur yang kontinyu untuk udara. Sebagian besar tipe ini adalah jalur tunggal (*single return*). Pada gambar 2.2 ditunjukkan rangkaian *close circuit windtunnel*.



Gambar 2.2 *Closed circuit wind tunnel* (Messina, 2012)

Keterangan gambar:

1. *Larger corner*
2. *Honeycomb, screens and nozzle*
3. *Test section*
4. *Second diffuser*
5. *First diffuser*
6. *Smaller corner*
7. *Fan*

Pada *Closed Circuit Wind tunnel* memiliki keuntungan dan kerugian diantaranya yaitu:

Keuntungan :

- Dengan menggunakan corner turning vanes, kualitas dari aliran dapat dengan mudah di control.
- Memerlukan energi yang lebih sedikit untuk kecepatan dan ukuran yang lebih besar.
- Tidak menyebabkan kebisingan.

Kerugian :

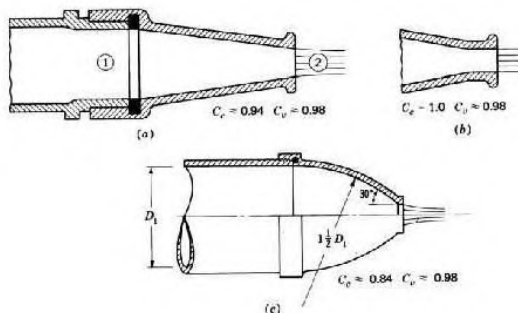
- Biaya awal yang lebih besar akibat penambahan saluran kembali (return ducts) dan corner vanes.
- Jika digunakan untuk saluran asap atau menjalankan motor pembakaran dalam, diperlukan saluran untuk pembuangan.





## 2.2 Geometri Nozzle

*Nozzle* adalah suatu komponen atau saluran yang mengalami pengecilan penampang secara bertahap (*gradual*). *Nozzle* banyak dimanfaatkan untuk mengarahkan suatu aliran atau untuk memodifikasi aliran dari suatu fluida baik *liquid* maupun gas. Berdasarkan bentuk penampangnya *nozzle* dibagi menjadi tiga jenis, yaitu *conical nozzle*, *straight – tip nozzle*, dan *fire nozzle*. Pada gambar 2.3 ditunjukkan ketiga bentuk *nozzle* beserta variabel yang mewakili geometri penting dari *nozzle* tersebut.



$C_c$  = coefficient of contraction  
 $C_v$  = velocity coefficient

Gambar 2.3 a) *Conical nozzle*, b) *Straight – tip nozzle*, c) *Fire nozzle* (Roberth dan Joseph, 1997)

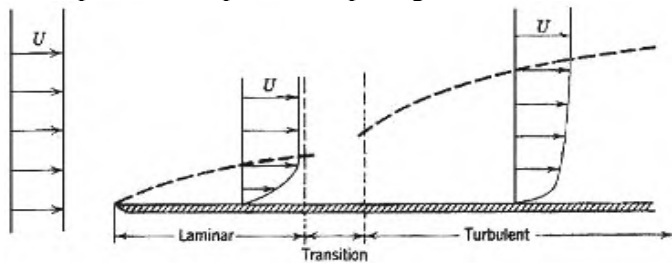
## 2.3 Konsep Boundary Layer

*Boundary layer* merupakan lapisan tipis di atas bidang aliran dimana di dalamnya terjadi distribusi kecepatan karena adanya pengaruh tegangan geser. Daerah di dalam *boundary layer* merupakan daerah *viscous* yang masih terpengaruh efek viskositas, sedangkan di luar *boundary layer* pengaruh viskositas sangat kecil sehingga dapat diberlakukan sebagai *inviscid flow*. *Boundary layer* dapat terjadi karena adanya pengaruh viskositas aliran yang mengalir di atas bidang aliran sehingga terjadi distribusi kecepatan. Konsep *boundary layer* ini pertama kali diperkenalkan oleh



Ludwig Prandtl pada tahun 1904. Menurut Prandtl, daerah aliran yang terjadi di sekitar *solid surface* dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah di dalam *boundary layer* dimana masih terpengaruh adanya tegangan geser dan daerah di luar *boundary layer* dimana efek *viskositas* sudah tidak berpengaruh (*inviscid core*).

Apabila ditinjau dari *regime* aliran, *boundary layer* ini dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu *laminar boundary layer* dan *turbulent boundary layer*. Di dalam aliran *boundary layer*, proses peralihan dari *boundary layer* laminar ke turbulen disebut sebagai keadaan transisi. Faktor yang mempengaruhi lamanya proses transisi adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan, gaya bodi dan gangguan aliran bebas. Proses pembentukan lapisan batas di atas sebuah plat datar dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2.4 *Boundary layer* laminar dan turbulen sepanjang pelat datar (Fox, et al, 2004)

Ketika aliran melintasi pelat datar, partikel-partikel fluida yang cukup dekat terhadap pelat terhambat oleh adanya tegangan geser. Lapisan batas menebal searah dengan aliran. Begitu lapisan batas mulai menebal, ketidakstabilan pun terjadi dan mengakibatkan percampuran partikel (gerak acak) dan pertukaran momentum dalam fluida hingga menyebabkan terbentuknya lapisan batas turbulen. Pada lapisan batas turbulen, profil kecepatan yang terbentuk lebih tebal (gemuk) dengan gradien kecepatan di permukaan pelat dan tegangan gesernya lebih tinggi daripada kondisi laminar maupun transisi.



### 2.3.1 Karakteristik *Boundary Layer*

Karakteristik *boundary layer* yang terbentuk dapat dinyatakan dengan besaran-besaran sebagai berikut:

a) *Disturbance Thickness* ( $\delta$ )

*Disturbance thickness* atau juga disebut sebagai ketebalan lapis batas didefinisikan sebagai jarak normal yang diukur dari permukaan benda padat hingga suatu titik dimana kecepatan aliran adalah 0.99 kali kecepatan *freestream*. Karena profil kecepatan berkembang secara halus dan asimtotik terhadap *freestream* maka ketebalan lapis batas sulit diukur secara tepat.

b) *Displacement Thickness* ( $\delta^*$ )

Gaya-gaya *viscous* yang menghambat aliran dalam *boundary layer* menyebabkan laju alir massa dengan adanya lapis batas lebih sedikit daripada laju alir massa tanpa adanya lapis batas. *Displacement thickness* ( $\delta^*$ ) adalah jarak dimana batas permukaan harus dipindahkan secara imajiner dalam aliran tanpa gesekan sehingga memberikan laju alir massa yang setara dengan penurunan laju alir massa yang terjadi akibat adanya lapis batas dan dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left( 1 - \frac{u}{U_{\infty}} \right) dy. \quad (2.1)$$

c) *Momentum Thickness* ( $\theta$ )

Sifat gaya-gaya *viscous* yang menghambat aliran dalam lapis batas juga mengakibatkan pengurangan fluks momentum jika dibandingkan dengan aliran *inviscid*. *Momentum thickness* ( $\theta$ ) didefinisikan sebagai ketebalan dari suatu lapisan fluida dengan kecepatan  $U_{\infty}$  dimana fluks momentumnya sama dengan pengurangan fluks momentum melalui lapis batas dan dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:



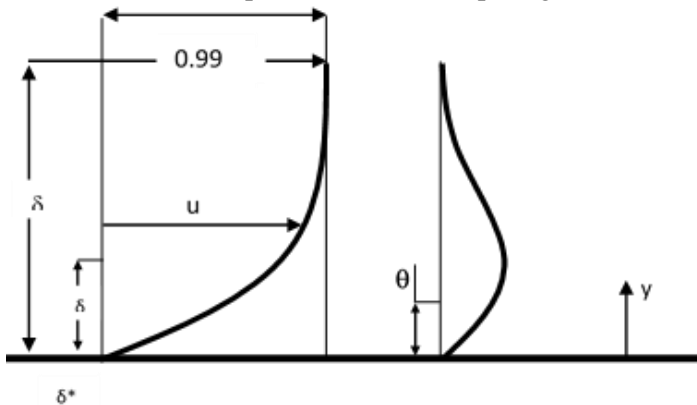
$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U_{\infty}} \left( 1 - \frac{u}{U_{\infty}} \right) dy. \quad (2.2)$$

d) *Shape Factor (H)*

*Shape factor* adalah perbandingan antara *displacement thickness* dengan *momentum thickness* dan dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$H = \frac{\delta^*}{\theta}. \quad (2.3)$$

Definisi *disturbance thickness*, *displacement thickness* dan *momentum thickness* dapat diilustrasikan seperti gambar 2.5.



Gambar 2.5 Definisi ketebalan *boundary layer*, *displacement thickness* dan *momentum thickness* (Fox, et al, 2004)

### 2.3.2 Pengaruh *Pressure Gradient* terhadap Kondisi *Boundary Layer*

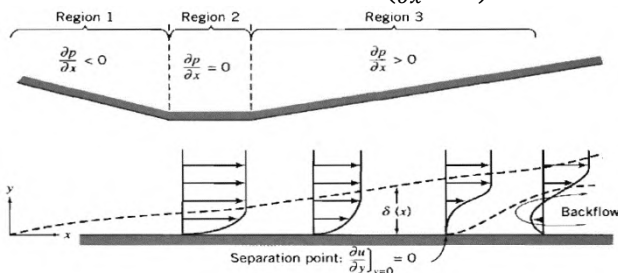
Perubahan tekanan pada aliran yang melewati suatu plat datar relatif kecil atau mendekati nol. Keadaan ini biasanya disebut dengan *zero pressure gradient*. Pada aliran yang melewati *zero*



*pressure gradient*, perkembangan *boundary layer* hanya dipengaruhi oleh tegangan geser.

Aliran yang melewati bidang dimana terjadi perubahan penampang akan mengalami perubahan tekanan di sepanjang aliran. Dengan adanya perubahan tekanan (*pressure gradient*) yang seiring dengan bertambahnya jarak maka akan berpengaruh pada kondisi *boundary layer*. Pada gambar 2.6 ditunjukkan bagaimana pengaruh *pressure gradient* terhadap kondisi *boundary layer*. Terdapat 3 daerah (*region*) *pressure gradient* sebagai berikut:

- *Region 1 (favorable pressure gradient)*, merupakan daerah terjadinya penurunan tekanan dikarenakan adanya pengecilan luas penampang yang berdampak pada peningkatan kecepatan fluida sehingga gradien tekanan yang terjadi negatif,  $\left(\frac{\partial p}{\partial x} < 0\right)$ .
- *Region 2 (zero pressure gradient)*, merupakan daerah yang memiliki luas penampang yang konstan (*constant area*) sehingga gradien tekanan bernilai nol,  $\left(\frac{\partial p}{\partial x} = 0\right)$ , namun tidak menyebabkan aliran fluida berhenti.
- *Region 3 (adverse pressure gradient)*, merupakan daerah terjadinya penurunan kecepatan karena membesarnya luas penampang sehingga akan terjadi peningkatan tekanan dan gradien tekanannya menjadi positif,  $\left(\frac{\partial p}{\partial x} > 0\right)$ .



Gambar 2.6. Perkembangan *boundary layer* akibat pengaruh *pressure gradient* (Fox, et al, 2004)

Apabila ditinjau mengenai kondisi partikel fluida di dekat area dinding, maka dapat dijelaskan bahwa terjadi akumulasi



tegangan geser pada partikel tersebut. Akumulasi ini berlaku untuk semua *pressure gradient region*. Kondisi ini tidak berdampak banyak pada daerah *favorable pressure gradient (region 1)*, karena tekanan pada inlet *region* lebih besar daripada tekanan *outlet* maka aliran dapat mengalir dengan lancar dan mengalami peningkatan kecepatan. Dalam kondisi ini partikel fluida dapat dianalogikan sedang menuruni sebuah bukit yang curam, sehingga dengan mudahnya partikel fluida tersebut bergerak pada *region* ini. Pada *region 2* ( $\delta p/\delta x = 0$ ), akumulasi tegangan geser tersebut berdampak pada penurunan momentum aliran. *Region 3* merupakan daerah yang paling tidak disukai oleh aliran, karena tekanan di inlet *region* lebih kecil daripada tekanan *outlet region*. Pada *region 3* partikel fluida seakan dipaksa untuk mendaki bukit yang curam. Aliran tidak memiliki cukup energi untuk melanjutkan perjalanan (defisit momentum) sehingga partikel fluida akan terdefleksi keluar dari *boundary* atau dapat dikatakan bahwa aliran mengalami separasi. Akibat tekanan *outlet* yang tinggi, maka terjadi aliran balik dari *outlet* menuju *inlet region* yang biasa disebut dengan peristiwa *backflow*.

### 2.3.3 Turbulen Struktur pada *Accelerating Boundary Layers*

*Turbulen boundary layers* pada kondisi *favorable pressure gradient* banyak ditemukan pada berbagai macam aplikasi teknologi (*ducts, airfoil, nozzle* dan lain – lain). Penelitian mengenai hal ini telah banyak dilakukan contohnya penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Jones dan Lander (1972), *Direct Numerical Simulation* (DNS) oleh Spalart (1986) dan *Large Eddy Simulation* (LES) oleh Esmaili dan Piomelli (1993). Dari semua penelitian ini diketahui bahwa jika percepatan sangat kuat, turbulensi aliran tidak dapat dipertahankan (fenomena relaminarisasi aliran). Pada *accelerated boundary layers* yang hampir sama, fenomena ini terjadi pada harga *pressure gradient parameter* ( $K=(v/U_E^2)/(dU_E/dx)$ ) kurang lebih  $3 \times 10^{-6}$  (Narasimha dan Sreenivasan, 1979). Spalart (1986) menemukan bahwa fluida





akan ter-relaminarisasi ketika bilangan Reynolds ( $Re_\theta$ ) mendekati nilai 330.

Penelitian numerik oleh Spalart (1986) dan Esmaili dan Piomelli (1993) dilakukan untuk menyelidiki bagaimana struktur turbulen termodifikasi pada aliran yang dipercepat. Visualisasi dari fluktuasi kecepatan *streamwise* yang dilakukan oleh Spalart menunjukkan *streaks* yang lebih panjang, jarak antar *streaks* yang lebih besar dan adanya daerah aliran diam. Hasil yang sama diperoleh oleh Esmaili dan Piomelli yang melakukan LES dari proses *relaminarization* yang hampir sama dengan Spalart. Mereka juga mengamati bahwa efek viskositas sangat besar pada daerah dekat dinding dimana mulai terjadi perkembangan daerah laminar.

## 2.4 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* merupakan salah satu faktor yang berpengaruh dalam proses terbentuknya suatu aliran. Semakin besar bilangan *Reynolds*, maka aliran yang terbentuk akan semakin turbulen. Aliran turbulen memiliki bentuk lebih *blunt* dibandingkan dengan aliran laminar, sehingga momentum aliran turbulen di dekat dinding lebih besar. Hal ini mengakibatkan aliran lebih tahan terhadap tegangan geser dan *adverse pressure gradient*. Persamaan bilangan *Reynolds* dapat dituliskan sebagai :

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.4)$$

dimana:  $\rho$  : Massa jenis fluida  
 $U_{ref}$  : *Central velocity* fluida pada *inlet test section*  
 $D_h$  : Diameter hidrolik  
 $\mu$  : Viskositas dinamis fluida

Dengan rumus  $D_h$  :

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.5)$$

Dimana :  $A$  : luas permukaan Inlet *nozzle*  
 $P$  : Keliling permukaan inlet *nozzle*



## 2.5 Pressure Coefficient ( $C_p$ )

Untuk menyatakan distribusi tekanan di dalam *nozzle* digunakan suatu koefisien yang dinamakan *pressure coefficient* ( $C_p$ ). *Pressure coefficient* merupakan perbandingan antara selisih tekanan statis lokal pada kontur dengan tekanan statis referensi pada *nozzle inlet* dibandingkan dengan tekanan dinamis yang diukur pada *inlet nozzle*.

$$C_p = \frac{p_{s,i} - p_{s,0}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}, \quad (2.6)$$

dimana:

- $p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/L_i = i$
- $p_{s,0}$  : tekanan statis referensi pada *inlet nozzle*
- $U_{ref}$  : kecepatan referensi pada *inlet test section*
- $\rho$  : massa jenis fluida
- $\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$  : tekanan dinamis *inlet nozzle*

## 2.6 Intensitas Turbulensi

Turbulensi merupakan fluktuasi irregular pada gerak atau aliran fluida di dalam medan aliran. Fluktuasi tersebut biasanya terjadi dalam tiga komponen kecepatan, dan tidak susah diprediksi secara detail. Turbulensi muncul dalam waktu sesaat di dalam ruang dan terjadi pencampuran propertis-propertis fluida sebagai akibat dari gradient tekanan. Gradient tekanan ini terjadi di dalam ruang atau dipengaruhi faktor lingkungan. Lingkungan-lingkungan aliran biasanya merupakan batas aliran, misal permukaan datar, sudut tajam, atau benda menghalangi aliran (*bluffbody*), dimana permukaan tersebut menghasilkan gradient tekanan sebagai akibat viskositas fluida.

Intensitas turbulensi merupakan derajat keturbulenan aliran di dalam suatu alat uji. Dalam suatu penelitian tidak diinginkan intensitas turbulensi yang besar, karena intensitas turbulensi dapat mempengaruhi hasil penelitian. Sehingga perlu adanya upaya untuk mengurangi intensitas turbulensi, agar didapatkan data hasil penelitian yang konsisten. Salah satu upaya untuk mengurangi intensitas turbulensi yaitu dengan menempatkan



screens pada sisi inlet setelah melewati honeycomb pada windtunnel. Suatu windtunnel dikatakan memiliki intensitas turbulensi yang baik jika memiliki nilai intensitas turbulensi  $\leq 1\%$ .

Pada suatu closed circuit windtunnel intensitas turbulensi sangat penting untuk dilakukan pengukuran. Hal ini dikarenakan pada rangkaian closed circuit windtunnel memiliki beberapa bagian yang memiliki luas penampang yang berbeda. Persamaan untuk menghitung intensitas turbulensi (IT) adalah sebagai berikut:

$$IT = \frac{U_{rms}}{\bar{U}} \times 100\% \quad (2.7)$$

$$U_{rms} = \sqrt{(U'(t) - \bar{U})^2} \quad (2.8)$$

dimana :

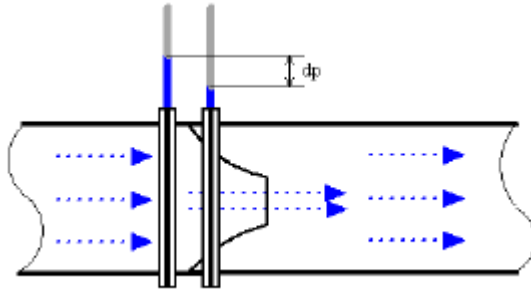
$\bar{U}$  : Kecepatan rata-rata, *m/s*

$U'$  : Kecepatan (*t*), *m/s*

## 2.7 Flow meter berbasis beda tekanan

Pada peralatan pengukur aliran berbasis perbedaan (penurunan) tekanan, aliran dihitung dengan mengukur pressure drop yang terjadi pada aliran yang melewati sebuah penghalang yang dipasang dalam aliran tersebut. Flowmeter berbasis perbedaan tekanan ini didasarkan pada persamaan Bernoulli dimana sinyal yang terukur (yaitu penurunan tekanan) merupakan fungsi dari kuadrat kecepatan aliran. (Robert W.Fox, Alan T. McDonald. *Introduction to Fluid Mechanics*. 1994; 360)

Nosel aliran sering digunakan sebagai elemen penukur untuk aliran udara dan gas pada aplikasi industri. Sebuah nosel aliran ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah ini. Nosel aliran relatif sederhana dan murah serta memungkinkan untuk aplikasi dengan berbagai material. Turn down ratio dan akurasi nosel aliran dapat disetarakan dengan orifice plate.



Gambar 2.7 Aliran Nozzle

### 2.7.1 Penerapan Persamaan Bernoulli pada Nozzle

Asumsikan aliran mengalir horizontal (dengan demikian elevasi tidak ada dan diabaikan) dan diabaikan *losses* aliran yang terjadi. Dengan persamaan Bernoulli menjadi

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (2.9)$$

Dimana :

$P$  = tekanan (Pa)

$\rho$  = densitas ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$V$  = Kecepatan Aliran (m/s)

Asumsikan profil kecepatan aliran seragam pada sisi hulu dan hilir, maka persamaan kontinuitas berlaku sebagai berikut:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.10)$$

Dimana :

$Q$  = Laju alir volume atau kapasitas ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A$  = luas penampang aliran ( $\text{m}^2$ )

Dengan mengkombinasi (2.9) dan (2.10),  $A_1 > A_1$ , menghasilkan persamaan “ideal”

$$q = A_2 \left( \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left( 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$



Untuk geometri tertentu, laju aliran dapat ditentukan dengan mengukur perbedaan tekanan  $p_1 - p_2$ . Laju aliran teoritis  $q$  dalam aplikasi praktis akan menjadi lebih kecil antara 2 % - 40 % akibat kondisi geometrinya. Persamaan 2.11 dapat dimodifikasi dengan menambahkan ( $C_d$ ) *discharge coefficient*, menjadi :

$$q = C_d A_2 \left( \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left( 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Berdasarkan persamaan *Bernoulli* dan Kontinuitas, kecepatan fluida akan mencapai nilai tertinggi dan tekanan terendah pada “*vena contraction*”. Setelah melewati peralatan pengukuran dan “*vena contracta*” akan terjadi penurunan kecepatan sampai pada level sebelum melewati penghalang. Sehingga persamaan dapat dimodifikasi diameternya menjadi :

$$q = C_d A_2 \left( \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (\beta)^4)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Dimana :

- $D$  = Diameter inlet nozzle (m)
- $d$  = Diameter outlet nozzle (m)
- $\beta$  = Rasio diameter  $d/D$

### 2.7.2 *Discharge coefficient*

*Discharge coefficient* ( $C_d$ ) merupakan rasio antara kapasitas actual terhadap teoritis (H.Krassow,1998) yang dinyatakan dalam rumus :

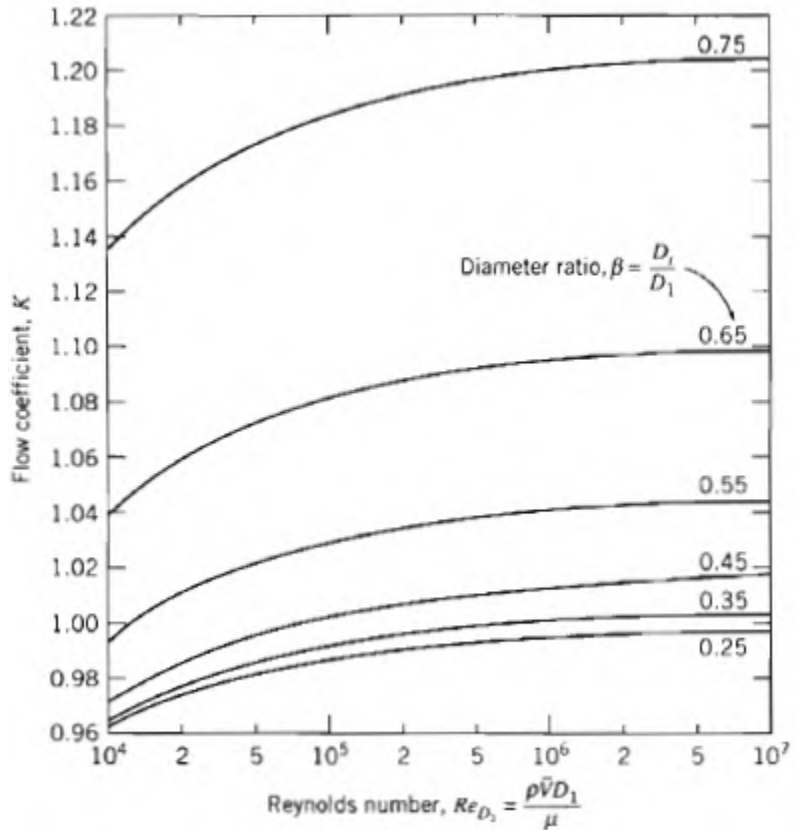
$$C_d = \frac{\text{Kapasitas actual}}{\text{Kapasitas teoritis}} = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{teoritis}}} \quad (2.14)$$

Dimana :

- $Q_{\text{actual}}$  = Kapasitas dengan pengukuran langsung dengan mendapatkan tekanan dinamis.
- $Q_{\text{teoritis}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta}} \sqrt{2\rho\Delta P}$  dimana  $\Delta P$  merupakan beda tekanan yang diukur pada inlet dan outlet aliran didalam *nozzle*



Berikut merupakan gambar 2.8 grafik *flow coeffiecient* terhadap Re pada *nozzle* :



Gambar 2.8 grafik *flow coefficient* terhadap Re (Fox, et al, 2004)

Berikut ini merupakan hubungan antara  $C_d$  dengan  $K$  pada persamaan 2.15 :

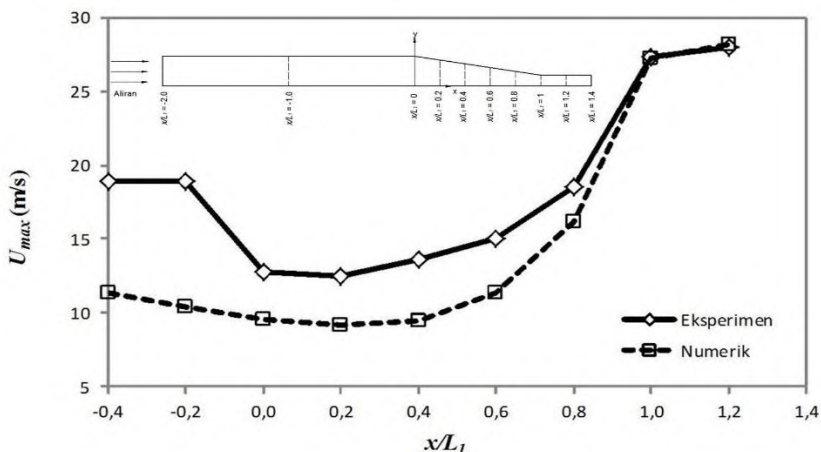
$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (2.15)$$





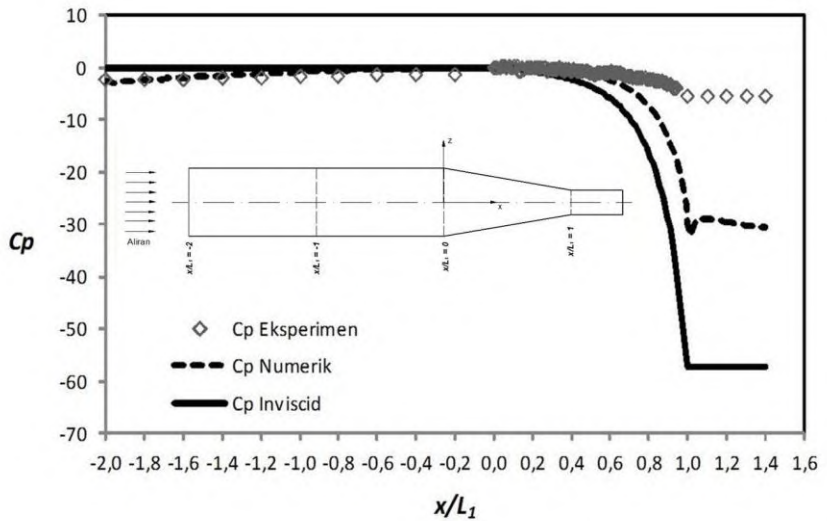
## 2.8 Penelitian Terdahulu tentang Aliran Melalui *Accelerated Boundary Layer*

Perdana (2013) melakukan penelitian dengan meneliti beberapa aspek yaitu distribusi kecepatan dan distribusi *pressure coefficient* pada sebuah *asymmetric walled nozzle*. Dari grafik distribusi kecepatan pada gambar 2.9 dapat disimpulkan bahwa kecepatan meningkat searah dengan pengurangan luas penampang. Hal tersebut sesuai dengan persamaan kontinuitas yang menyatakan bahwa kecepatan akan meningkat dan tekanan akan berkurang searah dengan pengurangan luas penampang.



Gambar 2.9 Grafik distribusi kecepatan maksimum ( $U_{max}$ ) dari hasil eksperimen dan numerik pada *asymmetric nozzle* (Perdana, 2013)

Selanjutnya Perdana (2013) meneliti pula *coefficient pressure* ( $C_p$ ) secara eksperimen dan numerik pada *asymmetric flat walled nozzle*. Hasil dari penelitian dapat dilihat pada gambar grafik 2.10.



Gambar 2.10 Grafik distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dari hasil eksperimen dan numerik pada *asymmetric nozzle* (Perdana, 2013)

Penelitian yang dilakukan Perdana (2013) menggunakan metode eksperimen. Penelitian yang akan dilakukan ini menggunakan metode penelitian eksperimen pula untuk mengetahui fenomena aliran melalui *nozzle* pada *closed loop wind tunnel*.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

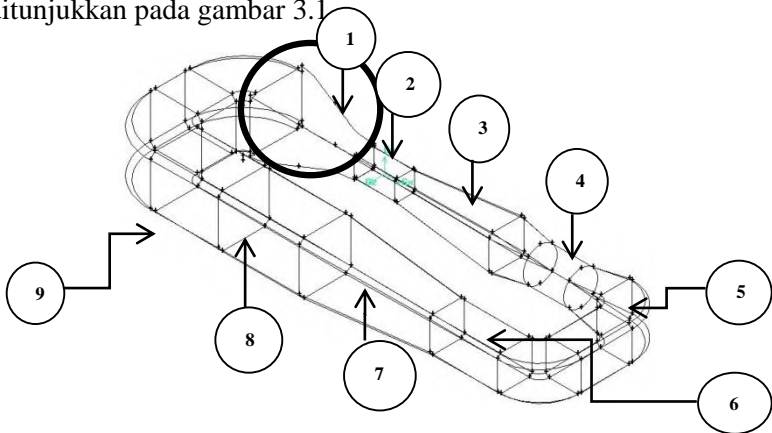


### **BAB 3 METODE PENELITIAN**

Pada bab ini dibahas metode penelitian yang akan digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen. Pembahasan meliputi instalasi dan test section penelitian, peralatan pendukung penelitian, analisa dimensi, prosedur pengambilan data, serta langkah-langkah dalam pengelolaan data.

#### **3.1 Instalasi Penelitian**

Instalasi penelitian merupakan susunan dari peralatan penelitian. Peralatan penelitian untuk eksperimen ini berupa benda uji dan peralatan pendukung yang digunakan dalam pengambilan data secara eksperimen. Skema instalasi peralatan penelitian ditunjukkan pada gambar 3.1



**Gambar 3.1 Skema Instalasi Penelitian**

Keterangan gambar :

- |                                  |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1. Nozel, honey comb dan screens | 6. Connector               |
| 2. Test section 1                | 7. Diffuser 2              |
| 3. Diffuser 1                    | 8. Test Section 2          |
| 4. Fan                           | 9. Elbow Besar             |
| 5. Elbow kecil                   | 10. Penyambung Elbow besar |



Dimensi dari *wind tunnel* adalah panjang 6489 mm, lebar 2250 mm dan tinggi 770 mm.

### 3.1.1 *Honey comb dan Screen*

*Honey comb*(1) dan *screen* berfungsi sebagai penyeragam aliran agar aliran yang akan masuk kedalam instalasi lebih *uniform* sehingga dapat mengurangi derajat turbulensi.

### 3.1.2 *Fan Axial*

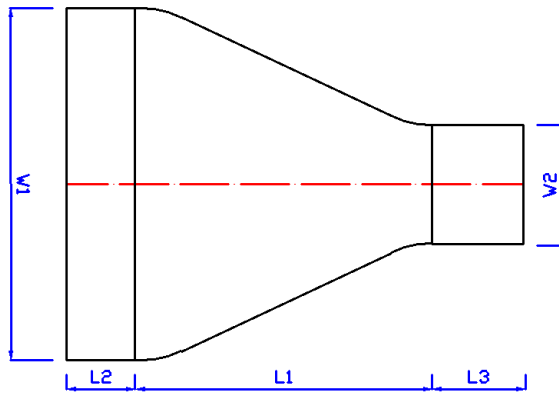
*Fan Axial* digunakan sebagai pembangkit aliran udara di dalam *wind tunnel*. Spesifikasi fan axial yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Merk : SAD-500/10/4/2
- Tipe : Direct Axial Fan
- Kapasitas : 15000 m<sup>3</sup>/hr
- Daya : 4 kW
- Putaran : 2800 rpm

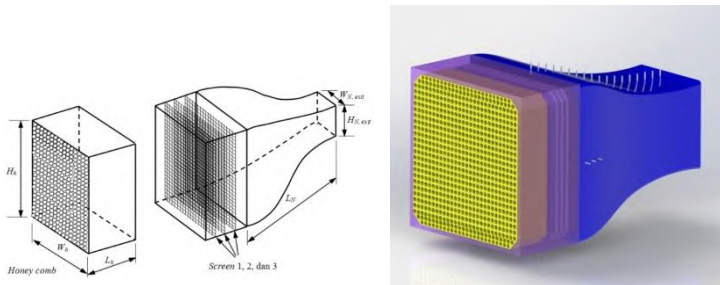
### 3.1.3 *Nozzle*

*Nozzle* (1) pada gambar 3.1 dan 3.2 merupakan komponen yang akan dikaji dan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Bahan : *Fiber*
- Tebal : 5 mm
- Tinggi Inlet ( $H_i$ ) : 770 mm
- Lebar Inlet ( $W_i$ ) : 770 mm
- Tinggi Outlet ( $H_o$ ) : 300 mm
- Lebar Outlet ( $W_o$ ) : 300 mm
- Panjang *Nozzle* ( $L_1$ ) : 630 mm
- Panjang *Upstream Nozzle* ( $L_2$ ): 150 mm
- Panjang *Downstream Nozzle* ( $L_3$ ): 220 mm
- Diameter Hidrolik ( $D_h$ ) : 806 mm
- $AR_{Nozzle}$  (  $A_i/A_o$  ) : 6.6



Gambar 3.1 Tampak samping *Nozzle* dan *test section*



Gambar 3.2 Skema *Nozzle*

### 3.2 Peralatan Pendukung

Peralatan pendukung yang digunakan untuk membantu dalam mengambil data-data eksperimen. Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- Stagnation pressure tube (Pitot tube) dan Mistar  
*Pitot tube* digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi pada beberapa titik yang telah ditentukan pada *nozzle*. Pada penelitian ini digunakan *Pitot tube* dengan diameter luar 0,7 mm. *Pitot tube* dihubungkan dengan *inclined manometer*, sehingga tekanan stagnasi yang terukur dapat dibaca dengan



perubahan ketinggian *liquid* pada *manometer*. Untuk memudahkan dalam melakukan pergeseran titik pengukuran secara vertikal, maka *Pitot tube* digabung dengan mikrometer dengan tujuan agar dapat melakukan pergeseran titik pengukuran stagnasi secara vertikal pada setiap *cross section* yang sama. Mistar yang digunakan memiliki skala pengukuran terkecil sebesar 1 mm. Pada gambar 3.3 ditunjukkan skema gabungan *Pitot tube* dengan mistar.

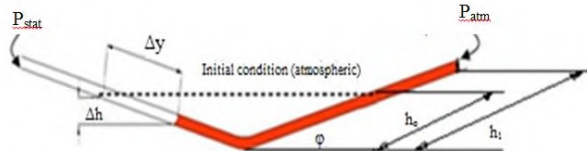


Gambar 3.3 Skema gabungan *Pitot tube* dengan Mistar

- *Wall pressure tap*  
*Wall pressure tap* digunakan untuk mengukur tekanan statis, pemasangannya di sepanjang dinding lokasi pengukuran. *Pressure tap* berbentuk lubang-lubang kecil berdiameter 5 mm. Selain itu, *pressure tap*, juga dipasang pada sisi dinding atas *nozzle*.
- *Inclined manometer (Manometer V)* dan Mistar  
*Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube*. *Manometer* yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar  $10^\circ$  yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan  $\Delta h$ . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang



terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Inclined manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Skala maksimum : 300 mm
- Fluida kerja : Red oil (SG = 0,827)
- Kemiringan : 15°

- *Thermometer*

*Thermometer* digunakan untuk mengukur temperatur udara di dalam ruangan pada saat eksperimen dilakukan

- *Pressure Transducer* dan data akuisisi

*Pressure transducer* ini merupakan alat ukur digital, dimana alat ini mengukur arus untuk mengetahui tekanan. *Wall pressure tap* dan *Pitot tube* dihubungkan ke alat ini dan hasilnya berupa arus atau tegangan yang dibaca melalui data akuisisi. Oleh karena itu diperlukan validasi agar dapat diketahui tekanan. Pada gambar 3.5 ditunjukkan gambar *pressure transducer* dan data akuisisi.



Gambar 3.5 *Pressure transducer* dan data akuisisi

Berikut spesifikasi *Transducer* yang akan digunakan dalam percobaan ini :





Untuk mengukur intensitas turbulensi

- Model : PX65-05BDI
- Range :  $\pm 3''$  WC
- Akurasi : 0.25 % FS (Full scale)
- Output : 4 – 20 mA
- Excitation : 13 – 36 Vdc
- Ser.no. : 3030238423

Untuk mengukur Cp dan U/Umax

- Model : PX653-0.5O5V
- Range :  $\pm 1''$  WC
- Akurasi : 0.25 % FS (Fullscale)
- Output : 1-5 VDC
- Supply : 13 – 36 Vdc
- Ser.no. : X13290059

a) Inverter

*Inverter* adalah alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan fan. Pada *inverter* output yang ditunjukkan yaitu berupa putaran dengan satuan rpm. Pada gambar 3.6 ditunjukkan penampang *inverter*.



Gambar 3.6 - *Inverter*

### 3.3 Analisa Dimensi Parameter-Parameter yang Dianalisa

Metode yang digunakan untuk mengetahui korelasi antara parameter-parameter yang saling mempengaruhi dalam suatu penelitian disebut dengan analisa dimensi. Korelasi parameter yang ditemukan adalah dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Analisa dimensi yang digunakan pada penelitian ini adalah untuk mengetahui variabel apa saja

---



yang mempengaruhi karakteristik aliran melalui *symmetric flat-walled octagonal nozzle* dengan *aspect ratio* konstan dengan variasi bilangan *Reynolds*. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran dalam penelitian ini adalah:

$\tau_w$	=	tegangan geser dinding
$\Delta p$	=	perbedaan tekanan statis
$\rho$	=	massa jenis fluida
$\mu$	=	viskositas absolut fluida
$u$	=	kecepatan lokal
$U_{ref}$	=	central velocity fluida pada inlet nozzle
$H_i$	=	tinggi inlet nozzle
$W_i$	=	lebar inlet nozzle
$H_o$	=	tinggi outlet nozzle
$W_o$	=	lebar outlet nozzle
$L_l$	=	panjang nozzle
$D_h$	=	Diameter hidrolik <i>inlet nozzle</i>

Dengan menganggap  $\tau_w$  dan  $\Delta p$  sebagai *dependent parameter* maka dapat dituliskan persamaan:

$$\tau_w = f_1(\rho, \mu, u, U_{ref}, W_i, H_i, W_o, H_o, L_l, D_h)$$

$$\Delta p = f_2(\rho, \mu, u, U_{ref}, W_i, H_i, W_o, H_o, L_l, D_h)$$

Dengan menggunakan teori *Buckingham Pi* maka diperoleh 10 grup tak berdimensi untuk kedua *dependent parameter*  $\tau_w$  dan  $\Delta p$  sebagai berikut:

Koefisien tekanan ( $C_p$ )

$$C_p = \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} L_1}, \frac{u}{U_{ref}}, \frac{H_i}{L_1}, \frac{W_i}{L_1}, \frac{H_o}{L_1}, \frac{W_o}{L_1}, \frac{D_h}{L_1}\right) \quad (3.1)$$

Dari grup tak berdimensi yang telah diperoleh, terdapat parameter yang konstan karena harganya sudah ditentukan sejak awal yaitu  $\frac{H_i}{L_1}, \frac{W_i}{L_1}, \frac{H_o}{L_1}, \frac{W_o}{L_1}, \frac{D_h}{L_1}$  parameter yang konstan tersebut dapat dikeluarkan dari fungsi grup tak berdimensi. Pada penelitian ini digunakan bilangan *Reynolds* berdasarkan pada diameter hidrolik ( $D_h$ ) *inlet nozzle*. Dengan melakukan pembagian antara grup tak berdimensi berikut:

$$\frac{\mu}{\rho U_{ref} L_1} \text{ dibagi dengan } \frac{D_h}{L_1},$$



maka diperoleh persamaan untuk menentukan bilangan *Reynolds* berdasarkan pada diameter hidrolik ( $D_h$ ) inlet nozzle,  $1/Re_{Dh} = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$ .

Berdasarkan penurunan persamaan di atas dapat ditentukan bahwa repeating parameters yang digunakan adalah  $\rho$ ,  $U_{ref}$ , dan  $D_h$ . Pada penelitian ini perubahan jarak pengukuran distribusi tekanan stagnasi ke arah vertikal pada beberapa jarak *test section*  $x/L_1$  didasarkan pada tinggi inlet nozzle. Untuk mendapatkan perubahan jarak  $y$  berdasarkan tinggi inlet nozzle  $W_1$ , maka dilakukan pembagian grup tak berdimensi berikut:

$$\frac{y}{L_1} \text{ dibagi dengan } \frac{W_1}{L_1}$$

maka diperoleh  $\frac{y}{W_1}$ .

Dari analisa-analisa tersebut maka diperoleh persamaan tak berdimensi sebagai berikut:

*Pressure Coefficient* ( $C_p$ )

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} = f_2 \left( \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{u}{U_{ref}}, \frac{x}{L_1}, \frac{y}{W_1} \right). \quad (3.2)$$

### 3.4 Prosedur Pengambilan Data Eksperimen

Prosedur penelitian eksperimen ini menggunakan 4 langkah pengambilan data yaitu langkah-langkah kalibrasi *inverter*, kalibrasi *pressure transduser* dan *inclined manometer*.

#### 3.4.1 Langkah-langkah kalibrasi *inverter*

- Memasang semua instalasi penelitian baik *nozzle* maupun peralatan pendukung.
- Memasukkan *Pitot tube* pada posisi *center line* yaitu pada posisi  $x = 0$  dan  $y = 385$  mm.
- Menghubungkan *Pitot tube* dengan *inclined manometer*.
- Memastikan kecepatan pada *Pitot tube* nol yaitu pada keadaan *fan* belum berputar.
- Mencatat ketinggian awal ( $h_0$ ) pada *inclined manometer* dari *Pitot tube*.



- f) Melepas inclined manometer dari Pitot tube dan memasangnya pada wall pressure tap.
- g) Mencatat ketinggian awal ( $h_0$ ) pada inclined manometer dari wall pressure tap.
- h) Menghidupkan *fan axial* dan menghidupkan *inverter*  $n = 0$  rpm.
- i) Mencatat perubahan ketinggian ( $\Delta h_s$ ) pada inclined manometer dari wall pressure tap.
- j) Melepas inclined manometer dari wall pressure tap dan memasangnya pada Pitot tube.
- k) Mencatat perubahan ketinggian ( $\Delta h_0$ ) pada *inclined manometer* dari *Pitot tube*.
- l) Mengulangi langkah i) sampai k) hingga  $n = 2700$  Rpm dengan menaikkan putaran setiap 300 serta melepas *inclined manometer* dari *Pitot tube* dan memasangnya ke *pressure tap*.
- m) Mematikan *Fan axial*.
- n) Menghitung tekanan statis yaitu  $P_s = \rho g \Delta h_s$  dan tekanan stagnasi yaitu  $P_0 = \rho g \Delta h_0$
- o) Menghitung kecepatan dari tekanan statis dan stagnasi.
- p) Memplot grafik  $u = f(n)$ .

### 3.4.2 Langkah-Langkah Kalibrasi Pressure Transducer dan Inclined Manometer

- a) Dari kalibrasi inverter didapatkan grafik  $u = f(n)$ .
- b) Meletakkan *Pitot tube* pada *center line* dan dihubungkan dengan *inclined manometer* dan *pressure transducer* dan data akuisisi.
- c) Mencatat ketinggian awal ( $h_0$ ) pada *inclined manometer*.
- d) Menghidupkan *fan axial*.
- e) Mengatur *inverter* untuk menghasilkan kecepatan 0 m/s berdasarkan grafik  $u = f(n)$
- f) Mencatat perubahan ketinggian ( $\Delta h$ ) pada *inclined manometer*.
- g) Mencatat arus (I) pada *pressure transducer* dan data akuisisi



- h) Mengulang f) sampai g) hingga kecepatan 32 m/s dengan mengatur *inverter* dengan menambah kecepatan setiap 4 m/s.
- i) Memplot grafik  $\Delta h = f(I)$ .
- j) Mematikan *fan axial*

### 3.4.3 Langkah-langkah Pengukuran *Coefficient Pressure (Cp)*

- a) Menghubungkan *wall pressure tap* saat  $x = 0$  mm dengan *pressure transducer* dan data akuisisi.
- b) Menghidupkan *fan axial*.
- c) Mengatur *inverter* untuk menghasilkan  $u = 10$  m/s.
- d) Mencatat arus (I) dari data akuisisi.
- e) Mengulangi langkah d) dengan mengukur *pressure tap* ke-1 sampai ke-18 dengan menambah  $x$  setiap 54 mm dari posisi  $x = 0$  mm hingga  $x = 1000$  mm.
- f) Mengkonversi arus (I) menjadi  $\Delta h$ .
- g) Menghitung tekanan statis.
- h) Menghitung *coefficient pressure* ( $C_p$ ).
- i) Mengulangi langkah d) sampai h) dengan menambah kecepatan *fan* dengan mengatur *inverter* untuk menghasilkan 30 m/s.
- j) Mematikan *fan axial*.
- k) Mendapatkan grafik *coefficient pressure* ( $C_p = f(x/Ln; Re)$ ).

### 3.4.4 Langkah-Langkah Pengukuran Profil Kecepatan

- a) Meletakkan *Pitot tube* pada posisi  $x = 0$  mm dan  $y = 0$  mm serta menghubungkannya dengan *pressure transducer* dan data akuisisi.
- b) Menghidupkan *fan axial*.
- c) Mengatur *inverter* dengan menghasilkan  $u = 10$  m/s.
- d) Mencatat arus (I) dari data akuisisi.
- e) Mengulangi langkah c) sampai d) hingga  $y = 18$  mm dengan menggeser *Pitot tube* vertikal setiap 1 mm.



- f) Mengulangi langkah c) sampai d) dari posisi  $y=18$  mm hingga  $y=48$  mm dengan menggeser *Pitot tube* vertikal setiap 2 mm.
- g) Mengulangi langkah c) sampai d) dari posisi  $y=48$  mm hingga  $y=98$  mm dengan menggeser *Pitot tube* vertikal setiap 5 mm.
- h) Mengulangi langkah c) sampai d) dari posisi  $y=98$  mm hingga  $y=198$  mm dengan menggeser *Pitot tube* vertikal setiap 10 mm.
- i) Mengulangi langkah c) sampai d) dari posisi  $y=198$  mm hingga  $y=358$  mm dengan menggeser *Pitot tube* vertikal setiap 20 mm.
- j) Mengulangi langkah c) sampai i) hingga  $x=0$  mm dengan menggeser *Pitot tube* horizontal setiap 333 mm.
- k) Mengulangi langkah c) sampai j) dari  $x=0$  mm hingga  $x=1000$  mm dengan menggeser *Pitot tube* horizontal setiap 333 mm.
- l) Mengulangi langkah c) sampai k) dengan menambah kecepatan *fan* dengan mengatur *inverter* untuk menghasilkan  $u=30$  m/s.
- m) Mendapatkan grafik  $u/U_{ref}=f(y/W_1; x/L_1; Re)$

### 3.5 Prosedur Pengolahan Data Eksperimen

Data Eksperimen yang diperoleh dari hasil pengukuran tekanan stagnasi dan tekanan statis digunakan untuk menghitung nilai *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *skin friction coefficient* ( $C_f$ ), *loss coefficient* ( $K$ ), dan distribusi kecepatan di sepanjang *nozzle*  $x/L_n=0$  sampai dengan  $x/L_n=1$ . Selanjutnya dibuat beberapa grafik sebagai berikut:

- a) Grafik kecepatan tak berdimensi fungsi ketinggian tak berdimensi,  $u/U_{ref} = f(y/W_i)$  pada beberapa jarak ( $x/L_n$ ) yang merupakan pengukuran tekanan titik stagnasi.
- b) Grafik *pressure coefficient* ( $C_p$ ) fungsi tak berdimensi,  $C_p = f(x/L_1)$ .
- c) Grafik *discharge coefficient* ( $C_d$ ),  $C_d = f(x/L_1)$ .
- d) Nilai intensitas turbulensi ( $IT$ )



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BAB 4

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa data dan pembahasan dari hasil eksperimen. Data yang diperoleh dari penelitian ini berupa data kuantitatif yang dipresentasikan dalam bentuk grafik. Data-data eksperimen diperoleh dari hasil mengukur distribusi tekanan pada *test section* di sepanjang *converging wall* dari sisi *inlet* sampai sisi *outlet nozzle* menggunakan *Pitot tube* dan *wall pressure tap* yang dihubungkan ke *pressure transducer*. Data-data yang telah didapatkan kemudian diolah dengan proses perhitungan dan dituangkan ke dalam grafik distribusi kecepatan maksimum  $U_{max} = f(x/L_i)$ , grafik profil kecepatan  $y/W_1 = f(u/U_{max\ local})$ ;  $y/W_1 = f(x/L_i)$ , grafik distribusi *pressure coefficient* ( $C_p = f(x/L_i)$ ), *coefficient discharge* ( $C_d$ ), dan Intensitas turbulensi ( $IT$ ).

Penelitian ini dilakukan dengan tiga bilangan *Reynolds* yang didasarkan pada diameter hidrolis dan kecepatan maksimum pada *inlet nozzle* sebesar . Tiga harga bilangan *Reynolds* pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan karakteristik *boundary layer* di dalam *symmetric nozzle*. Perbedaan karakteristik pada bilangan *Reynolds* tersebut dianalisa dan dibandingkan di dalam pembahasan. Data-data yang dianalisa meliputi:

1. Profil Kecepatan
2. Distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ )
3. Distribusi *coefficient discharge*
4. Intesitas Turbulensi ( $IT$ )

#### 4.1 Profil Kecepatan

##### 4.1.1 Distribusi Perubahan Kecepatan Maksimum

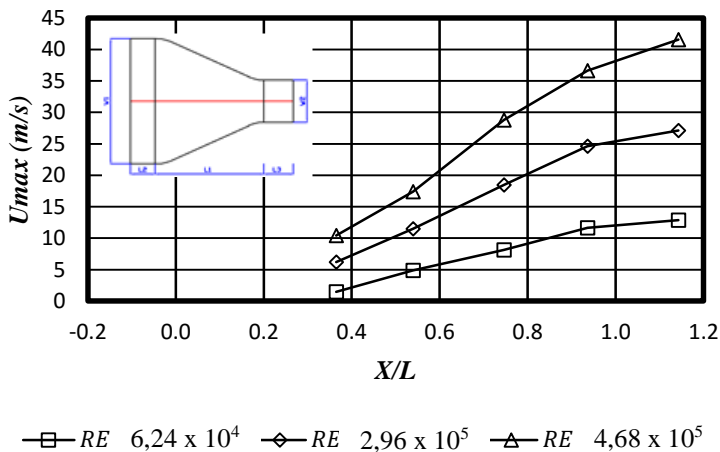
Apabila suatu fluida melintasi sebuah *nozzle* yang mengalami pengecilan penampang secara gradual, maka aliran fluida tersebut akan mengalami kenaikan secara gradual pula. Hukum kontinuitas untuk aliran *incompressible inviscid* dan *steady flow* menyatakan bahwa besarnya kenaikan kecepatan akan sebanding dengan besarnya perubahan penampang. Semakin kecil





perubahan penampang maka kenaikan kecepatan yang terjadi akan semakin besar pula. Penelitian pada *symmetric nozzle* ini menggunakan batasan penelitian yaitu aliran fluida bersifat *incompressible viscous, steady flow*, dan *isothermal*.

Adanya pengaruh viskositas dari fluida menyebabkan terbentuknya *boundary layer* sebagai akibat pengaruh tegangan geser dinding. Proses perkembangan *boundary layer* terjadi seiring dengan pertambahan jarak yang searah aliran. Perkembangan *boundary layer* pada *zero pressure gradient* dan *adverse pressure gradient*. Adanya *favorable pressure gradient* ini dapat menyebabkan terjadinya relaminasi aliran. Relaminasi aliran ini tidak dapat dilihat pada distribusi  $U_{max}$  hanya menampilkan kecepatan aliran utamanya.



Gambar 4.1 Distribusi kecepatan maksimum ( $U_{max}$ ) hasil

eksperimen untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$

Distribusi perubahan kecepatan maksimum di dalam *symmetric nozzle* dari hasil penelitian eksperimen untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  ditunjukkan



pada gambar 4.1. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa distribusi  $U_{max}$  dari hasil penelitian eksperimen untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  mengalami peningkatan dari nilai  $x/L_1 = 0,4$  sampai  $x/L_1 = 1,36$  dikarenakan peneliti hanya menyambil 5 titik pengujian distribusi kecepatan yaitu di titik  $x/L_1 = 0,37, 0,54, 0,75, 0,94$ , dan  $1,14$ .

Nilai peningkatan  $U_{max}$  hasil eksperimen pada perubahan jarak searah aliran  $\left( \frac{dU_{max}}{d\frac{x}{L_1}} \right)$  untuk  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  paling tinggi kemudian diikuti untuk  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan yang paling rendah adalah  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ . Pada jarak  $x/L_1 = 0,37$  (*inlet nozzle*) sampai  $x/L_1 = 1,14$ , aliran mengalami peningkatan  $U_{max}$  sebesar  $26,96 \text{ m/s}$  untuk  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  dan sebesar  $17,573 \text{ m/s}$  untuk  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  sedangkan untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  sebesar  $7,797 \text{ m/s}$ . Kondisi dimana aliran mengalami kenaikan  $U_{max}$  secara signifikan yang tinggi pada jarak  $x/L_1 = 0,54$  sampai  $x/L_1 = 0,94$  dapat mengindikasikan bahwa aliran tersebut mengalami perlambatan *boundary layer* dan *boundary layer* menipis. Perkembangan *boundary layer* terus melambat dan semakin menipis seiring dengan perubahan jarak didalam *nozzle*. Kemudian untuk jarak  $x/L_1 = 0,94$  sampai  $x/L_1 = 1,14$  terjadi kenaikan  $U_{max}$  yang tidak sebesar kenaikan yang terjadi pada daerah *nozzle*. Dengan kata lain, nilai  $\frac{dU_{max}}{d\frac{x}{L_1}}$  aliran tidak mengalami perubahan kecepatan yang sangat besar. Terjadinya perubahan kecepatan ini mengindikasikan bahwa pada rentang jarak tersebut profil kecepatan selalu berubah, sekalipun saat aliran melintasi *downstream channel* (penampang konstan). Hal ini menunjukkan bahwa hingga daerah *downstream channel*, aliran belum *fully developed flow*.

#### 4.1.2 Distribusi Profil Kecepatan

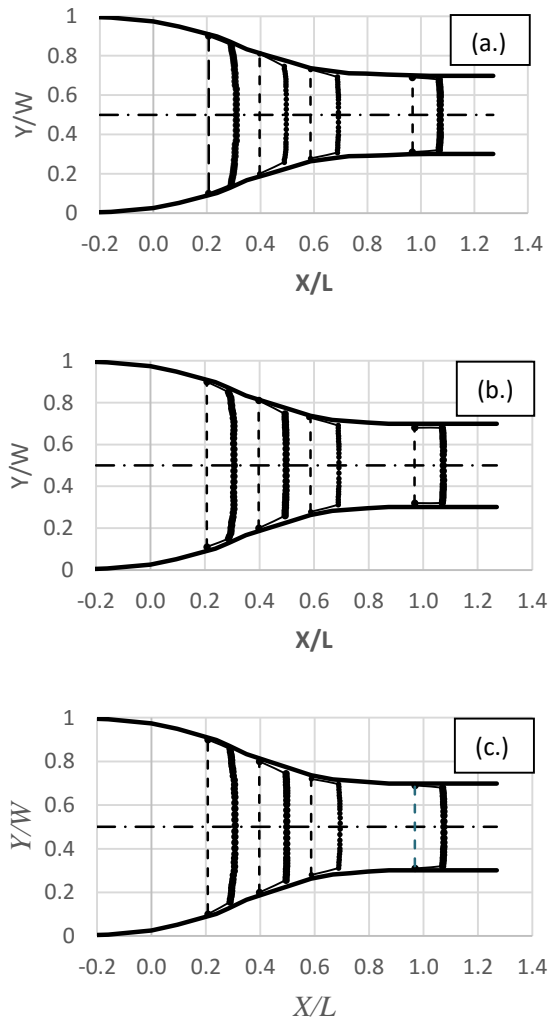
Kenaikan nilai kecepatan maksimum ( $U_{max}$ ) searah aliran seiring dengan pertambahan jarak didalam sebuah kontraksi *nozzle* simetris, salah satunya dipengaruhi oleh pengurangan luas penampang. Dalam penelitian ini hanya ditampilkan distribusi



profil kecepatan pada bidang (bidang  $x$ - $y$ ) karena proses pengambilan data tekanan dinamis hanya dilakukan pada bidang vertikal.

Fenomena aliran didalam konstruksi *symmetric nozzle* ini dapat dilihat pada gambar 4.2. Gambar 4.2 (a.) menunjukkan distribusi kecepatan hasil eksperimen di *symmetric nozzle* untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  sedangkan 4.2 (b.) menunjukkan distribusi profil kecepatan untuk  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  serta ambar 4.2 (c.) menunjukkan distribusi profil kecepatan untuk  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ . Harapan dari hasil distribusi ini dapat diprediksi dan dibuktikan teori kontinuitas. Profil kecepatan disajikan dalam bentuk grafik ketinggian tak berdimensi ( $y/W_1$ ) fungsi kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{max}$ ) pada jarak tak berdimensi ( $x/L_1$ ).  $u/U_{max}$  merupakan perbandingan antara setiap nilai kecepatan lokal pada sebuah *cross section*  $x/L_1$  dengan nilai  $U_{max}$  pada *cross section*  $x/L_1$  dengan nilai  $U_{max}$  pada *cross section* tersebut. Dengan demikian pada masing-masing *cross section*  $x/L_1$  nilai maksimum dari  $u/U_{max}$  adalah 1.

Aliran memasuki *upstream channel* ( $x/L_1 = -0,2$ ) dengan melalui *honeycomb* terlebih dahulu hingga  $x/L_1 = 0$  selanjutnya aliran melalui 2 *screen* pada  $x/L_1 = 0$  hingga 0,2. Pada eksperimen, data yang diambil pada *upstream channel* hanya pada jarak  $x/L_1 = 0$  hingga  $x/L_1 = 0,8$  dari total panjang *upstream nozzle* 630 mm. Dari profil kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 4.2 aliran dengan  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  memiliki *boundary layer* yang lebih tebal dari pada aliran dengan  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  serta pada  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  pada daerah *inlet upstream nozzle*. Ini ditandai dengan distribusi profil kecepatan *uniform* yang lebih banyak untuk  $Re_{Dh} = 5,85 \times 10^5$ . Aliran selanjutnya mengalir melalui *upstream nozzle* dan seiring perubahan jarak aliran mengalami penipisan *boundary layer* sampai pada *inlet nozzle* ( $x/L_1 = 0$ ).



Gambar 4.2 Distribusi Profil Kecepatan  $u/U_{maks}$  pada  
(a.)  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , (b.)  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$ , (c.)  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .



Pada  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  saat posisi  $x/L_I = 0,47$  hingga  $x/L_I = 0,94$  bentuk profil kecepatan relatif memiliki *trendline* yang sama dikarenakan pengaruh tegangan geser yang sangat besar dan momentum fluida tidak mampu melawan tegangan geser yang sangat besar. Sampai pada *inlet nozzle* aliran masih belum mengalami *fully developed* dikarenakan panjang *upstream channel* yang belum memenuhi batas minimum panjang saluran yang menghasilkan aliran *fully developed*. Untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  serta pada  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ , profil kecepatan pada  $x/L_I = 0$  menunjukkan distribusi yang simetris. Kesimetrisan disebabkan karena terjadi pengecilan luas penampang sesaat setelah *inlet nozzle* yang simetris bagian atas, bawah, samping kiri dan samping kanan.

Dari gambar 4.2 (a.), (b.) dan (c.) ditunjukkan bahwa perubahan profil kecepatan dipengaruhi oleh besarnya *reynolds number* dan tegangan geser sehingga akan berpengaruh terhadap perkembangan *boundary layer*.

#### 4.2 Distribusi *Pressure Coefficient* ( $C_p$ )

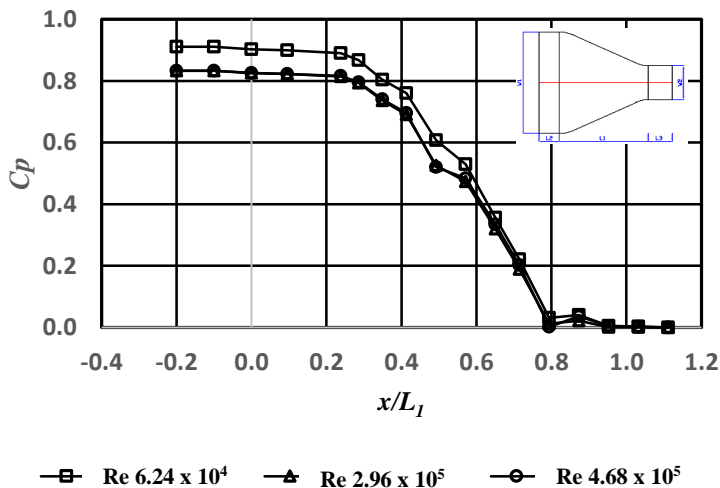
Pada bagian ini akan dijelaskan distribusi *pressure coefficient* pada aliran melalui *symmetric nozzle* ditinjau secara eksperimen. Gambar 4.3 menunjukkan distribusi  $C_p$  pada *upper wall* untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  serta pada  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  dari hasil eksperimen. Nilai  $C_p$  sesuai persamaan 2.6, dimana  $P_{ref}$  adalah tekanan statis pada *outlet nozzle* dan  $U_{ref}$  merupakan kecepatan *freestream* pada *outlet nozzle*. Saat didaerah *upstream channel* ( $x/L_I = -2,0$  hingga  $x/L_I = 0,0$ ), distribusi  $C_p$  pada *upper wall* untuk hasil penelitian eksperimen ini mengalami kecenderungan konstan. Fenomena ini terjadi karena masih terpengaruhnya daerah ini oleh *honey comb* dan *screen* didepannya.

Pada ketiga  $Re_{Dh}$  tersebut memiliki *trendline* yang hampir sama. Namun  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  memiliki  $C_p$  yang paling tinggi diikuti dengan  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  serta  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ . Saat akan memasuki *inlet nozzle*  $x/L_I = 0$  hingga  $x/L_I = 0,41$  pada ketiga



bilangan *reynolds* distribusi  $C_p$  mengalami penurunan namun saat  $x/L_1 = 0,57$  hingga  $x/L_1 = 0,79$  penurunan sangat drastis atau *sudden drop* hingga mencapai harga  $C_p$  sekitar 0. Fenomena ini dipengaruhi oleh adanya kenaikan nilai  $U_{max}$  seiring terjadinya penurunan tekanan dan perubahan jarak. Didaerah *downstream channel*  $x/L_1 = 0,79$  hingga  $x/L_1 = 1,11$  terjadi perubahan  $C_p$  yang kecil dan relatif konstan dikarenakan pada daerah ini mengalami luas penampang yang konstan.

Terjadinya fenomena *sudden drop* tekanan ini dikarenakan pada daerah ini merupakan pertemuan antara *exit nozzle* dengan saluran berpenampang konstan sehingga terjadi perubahan penampang secara tiba-tiba. Perubahan penampang secara tiba-tiba ini menyebabkan seolah-olah terdapat daerah kurva yang memiliki radius kecil. Kondisi meyebakkan keinkan kecepatan yang sangat besar karena adanya penyempitan lokal pada *streamline* akibat daerah kurva. Kenaikan kecepatan yang sangat besar ini menyebabkan terjadinya penurunan tekanan yang sangat besar.



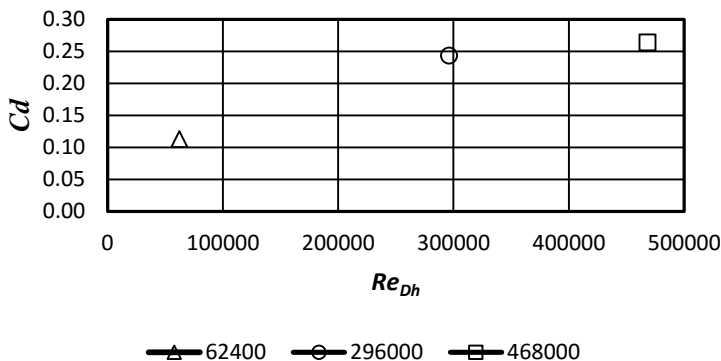
Gambar 4.3 Distribusi *Coefficient Pressure* ( $C_p$ )  
untuk  $Re_{Dh} = 6.24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$ ,  $Re_{Dh} = 4.68 \times 10^5$



Harga  $C_p$  maksimum pada *outlet nozzle* menyatakan kemampuan suatu *nozzle* menurunkan tekanan dengan cara mempercepat kecepatan aliran fluida yang mengalir di dalamnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin kecil  $C_p$  maka semakin baik performa dari *nozzle*.

### 4.3 Distribusi *Coefficient of Discharge* ( $C_d$ )

Besarnya *coefficient of discharge* ( $C_d$ ) dipengaruhi oleh besarnya bilangan *Reynolds* dan adanya pengurangan luas penampang dimana dalam hal ini  $C_d$  dihitung sesuai dengan persamaan 2.14. Pengurangan luas penampang ini berpengaruh pada peningkatannya kecepatan yang disertai turunnya tekanan. Untuk menghitung nilai  $C_d$  yang dilakukan pertama yaitu menghitung tekanan dinamis ( $\Delta p$ ) secara aktual pada sisi *outlet nozzle*. Setelah mengetahui tekanan dinamisnya maka kecepatan akan didapat dan selanjutnya menentukan debit dari aliran tersebut. *Coefficient of discharge* merupakan koefisien yang dihasilkan dari perbandingan debit secara aktual dibagi dengan teoritis/ideal. Pada gambar 4.4 ditunjukkan distribusi *coefficient of discharge* ( $C_d$ ) dengan ketiga bilangan *Reynolds*  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$ .



Gambar 4.4 Distribusi *coefficient of discharge* ( $C_d$ ) *nozzle* untuk *Reynolds*  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$



Grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.4 memiliki trendline yang meningkat. Pada  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  besarnya nilai *coefficient of discharge* sebesar 0,1126, untuk  $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$  besarnya nilai *coefficient of discharge* sebesar 0,2433 sedangkan untuk  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  besarnya nilai *coefficient of discharge* sebesar 0.2638. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar bilangan *Reynolds* maka nilai *Cd* semakin besar hal ini disebabkan karena kecepatan didalam *nozzle* semakin cepat dan pengaruh dari tegangan geser pada bilangan *Reynolds* yang besar.

#### 4.4 Intensitas turbulensi

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran intensitas turbulensi pada *outlet symmetric nozzle* untuk mengetahui fluktuasi kecepatan aliran. Sebelum memasuki *inlet nozzle, closed circuit windtunnel* ini melewati suatu *nozzle*, dimana inletnya dipasang *honeycomb*. Fungsi dari *honeycomb* ini adalah untuk penyearah aliran serta mengurangi derajat turbulensi.

Intensitas turbulensi dihitung menggunakan persamaan 2.7. Untuk menghitung intensitas turbulensi pada *inlet nozzle* pada posisi *centerline* yang pertama yaitu pengambilan data menggunakan *pressure transducer* dan DAQ Pro yang dihubungkan dengan laptop. *Setting logger* pada DAQ Pro pengambilan data dilakukan dengan jumlah 100 sampel/s selama 10 s dengan output voltase. Pengambilan data dilakukan pada output nozzle pada  $x/L_I = 0,87$ . Kemudian dilakukan pengolahan data pada setiap variasi *Re* hingga didapatkan grafik kecepatan (*Un*) terhadap waktu (*t*).

Dari data tabel 4.2 dapat diketahui bahwa intensitas turbulensi pada *nozzle*  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2.96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  dapat digolongkan rendah. Intensitas turbulensi ideal pada *test section* sebuah *windtunnel* seharusnya adalah kurang dari 1% atau mendekati 0% (Mehta,1989). Rendahnya intensitas turbulensi pada *nozzle* dipengaruhi oleh adanya *honeycomb* dan *screen*.

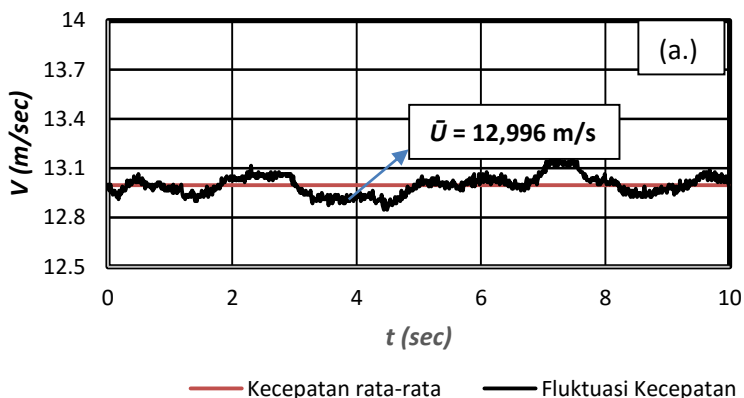


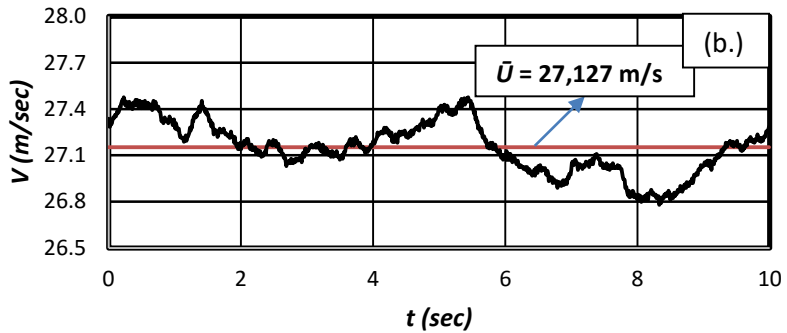


Tabel 4.2. perbandingan intensitas turbulensi pada setiap variasi  $Re$

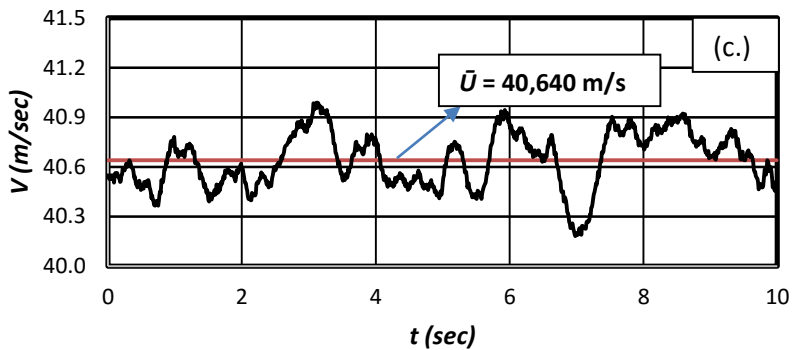
Bilangan <i>Reynolds</i>	$U_{avg}$ (m/s)	$IT$ (%)
$6,24 \times 10^4$	12,996	0,4563
$2,96 \times 10^5$	27.127	0,6153
$4,68 \times 10^5$	40,640	0,4103

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara yang melewati *symmetric nozzle* selalu berfluktuasi terhadap waktu disetiap bilangan *Reynolds*. Intensitas turbulensi diperoleh dengan membagi standar deviasi fluktuasi kecepatan ( $u'$ ) dengan kecepatan rata-rata ( $\bar{U}$ ). Dari grafik pada gambar 4.5 menunjukkan perbedaan ( $\bar{U}$ ).





— Kecepatan rata-rata — Fluktuasi Kecepatan



— Kecepatan rata-rata — Fluktuasi Kecepatan

Gambar 4.5 Sinyal fluktuasi kecepatan aliran udara pada  
(a.)  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ , (b.)  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$ , (c.)  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis pada penelitian mengenai karakteristik aliran di dalam *symmetrical flat-walled nozzle* pada *closed circuit windtunnel* dengan ketiga bilangan  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  dengan metode eksperimen, dapat dirumuskan beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Adanya penyempitan penampang secara gradual pada *nozzle* hingga *downstream channel* menyebabkan semakin besar nilai kecepatan maksimum searah aliran. Distribusi perubahan kecepatan maksimum di dalam *symmetric nozzle* dari hasil penelitian eksperimen untuk  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  mengalami peningkatan dari nilai  $x/L_1 = 0,4$  sampai  $x/L_1 = 1,36$ .
2. Profil kecepatan semakin mencembung di setiap *cross section*-nya. Hal ini menunjukkan bahwa aliran utama mengalami percepatan karena adanya penyempitan penampang secara gradual.
3. Adanya penyempitan penampang menyebabkan secara umum terjadinya kenaikan kecepatan dan menurunnya  $C_p$  sepanjang aliran luas penampang. Berdasarkan perbandingan data berupa *pressure coefficient* ( $C_p$ ) pada masing-masing bilangan *Reynolds* menunjukkan *trendline* yang hampir sama, peningkatan bilangan *Reynolds* tidak berpengaruh secara signifikan meningkatkan nilai  $C_p$ .
4. Besarnya *coefficient of discharge* ( $C_d$ ) dengan ketiga bilangan *Reynolds*  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  memiliki *trendline* yang meningkat. Pada  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  besarnya nilai *coefficient of discharge* sebesar 0,1126, untuk  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  besarnya nilai *coefficient of discharge* sebesar 0,2433 sedangkan untuk  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  besarnya nilai *coefficient of discharge* sebesar 0,2638. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar bilangan *Reynolds* maka



nilai  $C_d$  semakin besar hal ini disebabkan karena kecepatan didalam *nozzle* semakin cepat dan pengaruh dari tegangan geser pada bilangan *Reynolds* yang besar.

5. Intensitas turbulensi pada *outlet symmetric nozzle* pada *nozzle*  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$ ,  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  dan  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  dapat digolongkan rendah. Pada  $Re_{Dh} = 6,24 \times 10^4$  besarnya nilai intensitas turbulensi sebesar 0,4563%, untuk  $Re_{Dh} = 2,96 \times 10^5$  besarnya nilai intensitas turbulensi sebesar 0,6153% sedangkan untuk  $Re_{Dh} = 4,68 \times 10^5$  besarnya nilai intensitas turbulensi sebesar 0,4103%. Intensitas turbulensi ideal pada *test section* sebuah *windtunnel* seharusnya adalah kurang dari 1% atau mendekati 0%. Rendahnya intensitas turbulensi pada *nozzle* dipengaruhi oleh adanya *honey comb* dan *screen*.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penempatan orientasi *stagnation pressure tube* yang sejajar terhadap *streamline* merupakan hal yang sulit sehingga perlu adanya perbaikan bentuk dan ukuran dari *stagnation pressure tube*.
2. Sebaiknya menambah *holding time* dalam pengambilan data eksperimen agar data yang terbaca pada alat ukur tidak berfluktuasi.



## DAFTAR PUSTAKA

- Bechert, Dietrich W. 1995. Calibration of Preston Tubes. *AIAA J.* ; vol. 34 (1), pp. 205 – 206.
- Bijkersma, Jan. 2003. **Pressure Loss of Turbular Inlet Section of a Low Temperature Differential Heat Exchanger**, Rand Afrikaans University.
- Chaudhry, M.H. Yevjevich, V. 1981. **Closed Conduit Flow**, Water Resources Publication; pp. 255-278. USA.
- Cheng, D.Y. 1994. **Laminar Flow Elbow System and Method**. U.S. Patent Documents, No. 5,323,661.
- Escudier, M.P. Abdel – Hameed, A. Johnson, M.W. and Sutcliffe, C.J. 1998. Laminarisation and Re – transition of a Turbulent Boundary Layer Subjected to Favourable Pressure Gradient. *Experiments in Fluid* ; vol. 25.
- Esmaili, H. and Piomelli, Ugo. 1993. Large-eddy Simulation of Realminarizing Sink Flow Boundary Layers in Near-wall Turbulant Flows, pp. 287-296. Amsterdam; Elsevier Science Publishers.
- Fox, Robert W. Mc Donald, Alan T. and Pritchard, Philip J. 2004. **Introduction to Fluid Mechanics**, 6<sup>th</sup> edition. John Wiley and Sons, New York.
- Ghorbanian, Kaveh. 2010. **Experimental Investigation on Turbulance Intensity Reduction in Subsonic Windtunnels**, Aerospace Science and Technology



- Gonzales, Miguel. 2013. **Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel**. Science Direct. Spanyol.
- Hussain, Mahmood. Hussain, Ahmad. and Mussa, Mumther. 2005. Flow Calculation for a Two-Dimensional Irrigation Nozzle. *Journal of Engineering* ; vol. 11.
- Jackson, M. Davis. 2001. Nozzle Design for Coherent Water Jet Production, Department of Chemical Engineering, Louisiana State University.
- Messina, Michele. 2012. **Eksperimental Validation of Pressure Loss in Anemometer Testing Equipment**. Science Direct, Italy.
- Narasimha, R. and Sreenivasan, K. R. 1979. Relaminarization of Fluid Flows. *Advances in Applied Mechanics* ; vol. 19, pp. 221 – 309.
- Perdana, Taurista. 2013. Studi Eksperimental dan Numerik Karakteristik Aliran di Dalam Asymmetric 3D Flat-walled Nozzle. Teknik Mesin-ITS
- Piomelli, Ugo. Balaras, Elias. and Pascarelli, Andrea. 1999. Turbulent Structure in Accelerating Boundary Layers. *Journal of Turbulence* ; vol. 1 (1).
- Singh, Mansi., Singh, Neha., and Yadav, Sunil. 2013. **Review of Design and Contruction of an Open Circuit Low Speed Wind Tunnel**. Global Journal of Research in Engineering Mechanical and Mechanical Engineering, USA.
-



- Spalart, P. R. 1986. Numerical Study of Sink - Flow Boundary Layers. *J. Fluid Mech.* ; pp. 172 – 307.
- White, Frank M. 2001. **Fluid Mechanics**, 4<sup>th</sup> edition. McGraw Hill, New York.





*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **Biodata Penulis**



Penulis dilahirkan di Tulungagung, Jawa timur, 27 Januari 1992, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 003 Balikpapan Selatan (Balikpapan), SMPN 2 Balikpapan (Balikpapan), dan SMAN 1 Kedungwaru Tulungagung. Setelah lulus SMA pada tahun 2010, penulis mengikuti Seleksi SNMPTN dan diterima di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2011 dan terdaftar dengan NRP 2111 100 091. Di tahun kedua perkuliahan, penulis aktif sebagai Staff di Himpunan Mahasiswa Mesin, beberapa kepanitiaan tingkat jurusan, fakultas, dan Institut. Ditahun ketiga perkuliahan, penulis aktif di Keilmiah ITS sebagai Ketua Trainer Keilmiah ITS dan Pemandu aktif LKMM TD FTI ITS. Penulis pun aktif di kegiatan ekstra kampus seperti Forum Indonesia Muda angkatan 16. Ditahun ke 4 perkuliahan, penulis aktif di kegiatan Badan Eksekutif Mahasiswa sebagai Menteri Inovasi Karya 14/15. Selama perkuliahan penulis juga aktif mengikuti pelatihan – pelatihan manajemen diri, manajemen kegiatan, public speaking, serta aktif dalam mengikuti beberapa kompetisi karya tulis ilmiah tingkat nasional maupun internasional. Penulis sangat berharap agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta bagi penulis sendiri. Apabila pembaca ingin berkorespondensi dengan penulis, dapat melalui email : **[rizky.akbar.wiradhika@gmail.com](mailto:rizky.akbar.wiradhika@gmail.com)**